Alberto Carlos de Campos Bernardi
Alexandre Rossetto Garcia
José Alberto Bastos Portugal
José Ricardo Macedo Pezzopane
editores técnicos

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Cultivando o Futuro



editora cubo
Embrapa

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Cultivando o Futuro

Alberto Carlos de Campos Bernardi
Alexandre Rossetto Garcia
José Alberto Bastos Portugal
José Ricardo Macedo Pezzopane
Editores Técnicos

1ª edição
São Carlos, SP
2026

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Cultivando o Futuro

Alberto Carlos de Campos Bernardi
Alexandre Rossetto Garcia
José Alberto Bastos Portugal
José Ricardo Macedo Pezzopane
Editores Técnicos

editora cubo
soluções para o universo acadêmico

Embrapa

Editora Cubo
Rua Conde do Pinhal 1762, Centro
13560-648 São Carlos, SP
https://editoracubo.com.br

Responsável pelo conteúdo e editoração
Embrapa Pecuária Sudeste
Rod. Washington Luiz, Km 234 - Fazenda Canchim
13560-970 São Carlos, SP
https://www.embrapa.br/pecuaria-sudeste

Revisores técnico-científicos
Alberto Carlos de Campos Bernardi
André de Faria Pedroso
Claudia de Mori
Fábio Ribeiro Pires
José Ricardo Macedo Pezzopane
Marco Antonio Sundfeld da Gama
Sandra Aparecida Santos

Edição executiva: Cibele Lourdes dos Santos Pereira
Projeto gráfico e capa: Larissa Orlandi
Foto de capa: Gisele Rosso
Revisão de texto: Agnaldo Alves
Normalização bibliográfica: Luiza Tofoli dos Santos
Diagramação: Cibele Lourdes dos Santos Pereira
Ilustrações: Douglas Rejowski e Cibele Lourdes dos Santos Pereira
Colaboração: Aisten Baldan e Maria Cristina Campanelli Brito

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Integração lavoura-pecuária-floresta : cultivando o futuro [livro eletrônico] /
editores técnicos Alberto Carlos de Campos Bernardi,
Alexandre Rossetto Garcia, José Alberto Bastos Portugal,
José Ricardo Macedo Pezzopane. --
1. ed. -- São Carlos, SP : Cubo Multimídia,
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-86819-42-7

1. Agricultura - Aspectos ambientais 2. Florestas 3. Lavoura 4. Meio ambiente - Aspectos econômicos 5. Pecuária - Brasil
6. Saúde ambiental 7. Sustentabilidade
I. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. II. Garcia, Alexandre Rossetto. III. Portugal, José Alberto Bastos. IV. Pezzopane, José Ricardo Macedo.

26-356103.0 CDD-304.2

Índices para catálogo sistemático:
1. Agricultura e meio ambiente : Ecologia 304.2
Livia Dias Vaz - Bibliotecária - CRB-8/9638

https://doi.org/10.4322/9786586819427

Realização

Apoio

Parte de figuras foram obtidas a partir do banco de imagens ***Magnific***, mediante licenciamento.
As opiniões, conceitos, afirmações e conteúdo desta publicação são de exclusiva e de inteira responsabilidade dos autores.
© Todos os direitos reservados aos Editores.

Este é um livro publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Editores Técnicos

Alberto Carlos de Campos Bernardi
Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Alexandre Rossetto Garcia
Médico Veterinário, Doutor (Reprodução Animal),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

José Alberto Bastos Portugal
Biólogo, Doutor (Ciência e Tecnologia de Alimentos),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

José Ricardo Macedo Pezzopane
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Agrometeorologia),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Autores

Adilson Márcio Malagutti
Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciência Animal e Pastagens,
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Alberto Carlos de Campos Bernardi
Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Alda Juliana Castro de Sousa
Zootecnista, Mestre em Ciência Animal, Doutoranda (Ciência Animal) na
Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho" (FCA/UNESP), Botucatu/SP.

Alex Calderaro Peruchi
Engenheiro Agrônomo, Mestrando (Zootecnia) na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de
Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), Pirassununga/SP.

Alexandre Berndt
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Ecologia de Agroecosistemas),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Alexandre Rossetto Garcia
Médico Veterinário, Doutor (Reprodução Animal),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Amanda Hernandes
Engenheira Agrônoma, Doutora (Agronomia- Produção Vegetal),
Especialista Agropecuário, Ribeirão Preto/SP.

Amanda Maria Tadini
Química Ambiental, Doutora (Química Analítica e Inorgânica),
Professora da Sorbonne Université, Paris, França.

André de Faria Pedroso
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Ciência Animal e Pastagens),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

André Luiz Monteiro Novo
Engenheiro agrônomo, Doutor (Sistemas de Produção),
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Andreza Pereira da Silva Cruz
Engenheira Agrônoma, Especialista em Integração Lavoura-Pecuária-Floresta,
Coordenadora de projetos da Associação Rede ILPF, São Paulo/SP.

Angélica Maria Penteado Dias
Licenciada em História Natural, Doutora (Zoologia),
Professora Titular da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Carlos Henrique de Paula e Silva
Engenheiro Agrônomo, Especialista Agropecuário da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (CATI/SAA), Jardinópolis/SP.

Carolina Reigada Montoya
Bióloga, Doutora (Ciências Biológicas — Zoologia),
Professora da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Cristiam Bosi
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Engenharia de Sistemas Agrícolas),
Engenheiro Agrônomo da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Paranavaí/PR.

Cristiane Vieira Peres Fragalle
Relações Públicas, Mestre (Engenharia de Produção),
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Danilo Serra da Rocha
Engenheiro Cartógrafo, Mestre (Agricultura de Precisão),
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Domingos Sávio Campos Paciullo
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Zootecnia),
Pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora/MG.

Edilson da Silva Guimarães
Analista de Sistemas, Mestre (Ciências-Desenvolvimento de Software),
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Emerson Borghi
Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia (Agricultura),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Estella Rosseto Janusckiewicz
Zootecnista, Doutora em Zootecnia (Forragicultura e Manejo de Pastagens),
Assistente Técnica da Rede ILPF, São Paulo/SP.

George Gardner Brown
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Ciência do Solo),
Pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo/PR.

Giovanna Galhardo Ramos
Médica Veterinária, Mestre (Reprodução Animal), Doutoranda (Reprodução Animal)
na Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal/PA.

Gisele Rosso
Jornalista, Mestre em Comunicação Pública,
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Gustavo Pereira Valani
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Solos e Nutrição de Plantas),
Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna/SP.

Gustavo Verruma Bernardi
Engenheiro Agrônomo, Mestrando (Ecologia Aplicada), no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, e Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (CENA/ESALQ/USP), Piracicaba/SP.

Hélio de Sena Gouvêa Omote
Médico Veterinário, especialista em Agronegócios,
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Henrique Antunes de Souza
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas),
Pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina/PI.

Henrique Bauab Brunetti
Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciências (Ciência Animal e Pastagens),
Pesquisador da Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral/CE.

Hildo Meirelles de Souza Filho
Economista, Doutor (Economia Rural),
Professor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

João Brunelli Júnior
Engenheiro Agrônomo, Diretor de Assistência Técnica Integral da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (CATI/SAA), Campinas/SP.

Joedson Dantas Gonçalves
Médico Veterinário, Doutor (Ciências Veterinárias),
Pós-Doutorando na Embrapa Pecuária Sudeste (São Carlos/SP).

Jorge Lulu, Engenheiro Agrícola
Doutor (Física do Ambiente Agrícola),
Pesquisador da Embrapa Territorial, Campinas/SP.

José Alberto Bastos Portugal
Biólogo, Doutor (Ciência e Tecnologia de Alimentos),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

José Otávio de Almeida Bueno
Gestor e Analista Ambiental, Doutorando (Ciências da Engenharia Ambiental) na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), São Carlos/SP.

José Ricardo Macedo Pezzopane
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Agrometeorologia),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Juliana Priscila Sussai
Relações Públicas, Especialista em Comunicação Organizacional,
Analista da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Ladislau Martin Neto
Físico, Doutor (Física Aplicada), Pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos/SP.

Larissa Aparecida Lopes de Souza
Engenheira de Produção, Doutoranda (Modelagem de Sistemas Produtivos e Logísticos) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Larissa Gui Pagliuca
Engenheira Agrônoma, Doutoranda (Economia Aplicada) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Laysa Fontes Moura
Zootecnista, Mestranda em Zootecnia (Nutrição e Produção Animal) na Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (FCA/UNESP), Botucatu/SP.

Leticia Caroline da Silva David
Bacharel em Estatística, Doutoranda (Engenharia de Produção) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Lilianne dos Santos Maia Bruz
Engenheira Agrônoma, Doutora (Ciências do Solo), Bolsista Técnico II na Embrapa Florestas, Colombo/PR.

Lívia Ferreira Pinho
Engenheira Agrônoma, Doutora (Produção Animal), Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal/PA.

Lucas Fillietaz Balcão
Zootecnista, Doutor (Ciência Animal e Pastagens), Coordenador na Phibro Saúde Animal Brasil, Guarulhos/SP.

Luiz Adriano Maia Cordeiro
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Fitotecnia), Pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina/DF.

Luiza Campos Giglio
Gestora e Analista Ambiental, Mestranda (Ciências Ambientais) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) São Carlos/SP.

Marcela de Mello Brandão Vinholis
Engenheira Agrônoma, Doutora (Engenharia de Produção), Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Marcelo José Carrer
Economista, Doutor (Engenharia de Produção), Professor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Márcia Cristina de Sena Oliveira
Médica Veterinária, Doutora (Medicina veterinária preventiva), Pesquisadora aposentada da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Marcos Rafael Gusmão
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Entomologia), Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Maria Luiza Franceschi Nicodemo
Zootecnista, Doutora (Agricultura), Pesquisadora aposentada da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Marie Luise Carolina Bartz
Bióloga, Doutora em Agronomia (Solos), Professora Visitante na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Curitibanos/SC.

Marina Justi
Engenheira Agrônoma, Doutora (Ciência do Solo), Pós-doutoranda
na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Martha Regina Lucizano Garcia
Bióloga, Doutora (Microbiologia Agropecuária), Chefe de Serviço - Serviço de
Treinamento da Diretoria de Assistência Técnica Integral da Coordenadoria de Assistência
Técnica Integral da Secretaria de Agricultura e Abastecimento
do Estado de São Paulo (CATI/SAA), Campina/SP.

Matheus Alves de Siqueira
Biólogo, Doutor em Ciências (Ecologia e Recursos Naturais),
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Maurel Behling
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Solos e Nutrição de Plantas),
Pesquisador da Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop/MT.

Patrícia Menezes Santos
Engenheira Agrônoma, Doutora (Agronomia),
Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Patrícia Perondi Anchão Oliveira
Engenheira Agrônoma, Doutora (Ciências),
Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Paulo Henrique Mazza Rodrigues
Médico Veterinário, Doutor (Nutrição Animal), Professor Associado da Faculdade de Medicina
Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo (FMVZ/USP), Pirassununga/SP.

Pedro Henrique de Godoy Fernandes
Engenheiro Florestal, Doutor (Ciências Ambientais),
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Priscila de Oliveira
Engenheira Agrônoma, Doutora (Fitotecnia),
Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna/SP.

Renato Serena Fontaneli
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Sistemas de Produção),
Pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo/RS.

Roberto Giolo de Almeida
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Zootecnia),
Pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande/MS.

Rodrigo Damasceno
Bacharel em Ciências Econômicas, Mestre (Engenharia de Produção),
Pesquisador da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP.

Rolando Pasquini Neto
Médico Veterinário, Mestre (Ciência Animal), Doutorando (Nutrição e Produção Animal) na
Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo (FMVZ/USP),
Pirassununga/SP.

Salete Alves de Moraes
Zootecnista, Doutora (Ciência Animal), Pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina/PE.

Sandra Aparecida Santos
Zootecnista, Doutora (Produção Animal),
Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Sérgio Novita Esteves
Médico Veterinário, Doutor (Ciências da Alimentação),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Sergio Raposo de Medeiros
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Ciência Animal e Pastagem),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Tadário Kamel de Oliveira
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Engenharia Florestal),
Pesquisador da Embrapa Acre, Rio Branco/AC.

Teresa Cristina Alves
Médica Veterinária, Doutora (Qualidade e Produtividade Animal),
Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Thaís Alves de Carvalho
Tecnóloga em Processos Químicos, Mestre (Agricultura Tropical e Subtropical),
Doutoranda (Zootecnia) na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), Pirassununga/SP.

Thiago Libório Romanelli
Engenheiro Agrônomo, Doutor (Pegadas ambientais),
Professor Titular na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” (Esalq/USP),
Piracicaba/SP.

Waldomiro Barioni Júnior
Bacharel em Estatística, Mestre em Agronomia (Estatística e Experimentação Agronômica),
Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

Wanderlei Bieluczyk
Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciências (Energia Nuclear na Agricultura),
Agente de Pesquisa na Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
de Santa Catarina (Epagri), Florianópolis/SC

Wilfredo Manuel Rios Rado
Engenheiro Zootecnista, Mestrando (Zootecnia) na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de
Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), Pirassununga/SP.

Agradecimentos

O sucesso e a consolidação dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na Embrapa Pecuária Sudeste são fruto de 20 anos de pesquisa contínua, viabilizados por uma rede robusta de parceiros públicos e privados que acreditaram na evolução para uma agropecuária sustentável. Expressamos nosso profundo reconhecimento às agências de fomento, instituições e empresas que financiaram e colaboraram em projetos fundamentais para o avanço do conhecimento científico e tecnológico:

À **Embrapa**, pelo suporte contínuo por meio dos projetos financiados e cofinanciados sobre dinâmica de gases de efeito estufa, serviços ecossistêmicos, agricultura e pecuária de precisão, ferramentas de suporte à tomada de decisão, bem-estar e produção animal além de iniciativas de transferência de tecnologias e capacitação como o Integra SP e o Pecuária Eficiente.

Ao **Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)**, pelo apoio vital via Termos de Execução Descentralizada (TEDs) para o desenvolvimento de tecnologias de pecuária de precisão e soluções inovadoras para a produção de Leite de Baixo Carbono (LBC) (TEDs 6884467/420013/00001; 21000.089244/2019-11 – CÓD. 325).

À **Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo (SSA/SP)** e **Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI)** pela atuação nas parcerias estratégicas para promoção e implementação de sistemas ILPF no estado de São Paulo.

Ao poder Legislativo, pelas emendas parlamentares individuais e de bancada de São Paulo que fortaleceram a infraestrutura, a pesquisa, a transferência de tecnologias e a inovação nos sistemas integrados.

À **Fapesp**, pelo patrocínio de estudos diversos e essenciais, incluindo a arborização de pastagens com espécies nativas, controle de parasitas gastrintestinais, desempenho reprodutivo de bovinos de corte, manejo de eucalipto em ILPF, conforto térmico animal, dinâmica do carbono e inciativas pioneiras de pecuária de precisão, como o projeto "*The Connected Cow*". (Processos 2007/03579-9; 2012/05858-0; 2015/26627-5; 2016/02959-1; 2017/20084-5; 2019/04528-6; 2019/23449-0; 2021/04335-3; 2023/02444-5).

Ao **CNPq**, pelo fomento estratégico a pesquisas voltadas à sustentabilidade, influência no microclima, dinâmica de água no solo e resposta produtiva da pastagem em sistemas silvipastoris e integrados (Projetos 485261/2007-3; 478067/2013-5; 404513/2021-2; 406866/2022-8).

À **Associação Rede ILPF,** cuja atuação sempre foi essencial para a pesquisa multidisciplinar e para a transferência de tecnologia diretamente para o campo.

À **Universidade Estadual Paulista (UNESP)**, **Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)**, **Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)**, **Universidade Federal do Pará (UFPA)**, **Universidade Federal Fluminense (UFF)**, **Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)**, **Universidade de São Paulo (USP)**, **Universidade de Évora**, **Università degli Studi di Milano** e **Università di Bologna**, pelas parcerias estratégicas integrando pesquisas de vanguarda e formação acadêmica de excelência, fortalecendo os sistemas ILPF.

Às parcerias com empresas e organizações privadas, cujo apoio foi indispensável para a consolidação dos sistemas integrados, realização de atividades pesquisa e desenvolvimento, validação e transferência de tecnologias, permitindo a conexão da ciência às demandas reais do setor agropecuário.

Ao **Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS)**, pelo apoio na execução de projeto de cooperação técnica internacional, com foco na promoção de agricultura sustentável, de baixo carbono e desenvolvimento rural.

Prefácio

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é uma estratégia de produção agropecuária para enfrentar os grandes desafios da sociedade brasileira e global nas próximas décadas, como o crescimento populacional, as mudanças climáticas e a escassez de recursos. Ela materializa o conceito de que produzir e preservar não são atividades antagônicas, mas sim, as duas faces da moeda da sustentabilidade futura.

É com profundo senso de propósito e orgulho que apresentamos a obra "*Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Cultivando o Futuro*". O livro que une ciência, inovação e experiência. Como resultado aponta tecnologias para o produtor rural para aumentar a produtividade com sustentabilidade, seja na pequena, média ou grande propriedade.

A essência desta publicação reside em seu conteúdo técnico-científico robusto, alicerçado em 20 anos de pesquisa, validações em campo, comunicação e transferência de tecnologias realizadas pela equipe da Embrapa Pecuária Sudeste e parceiros. O leitor encontrará aqui os fundamentos para o planejamento, implantação e manejo dos sistemas ILPF.

A complexidade de um sistema que promove simultaneamente a produção e a sustentabilidade exige a participação de uma equipe colaborativa e multidisciplinar. Esta obra é fruto da colaboração de 77 autores entre pesquisadores, técnicos, professores e estudantes de graduação e pós-graduação. Essa união de expertises enriqueceu o conteúdo, e garantiu a visão holística necessária para abordar a ILPF em sua totalidade. Cada um dos 20 capítulos é fruto de um diálogo constante, em que a diversidade de conhecimentos se transformou em nossa maior fortaleza, perimitindo análises aprofundadas e soluções integradas.

Este livro é, portanto, um convite à inovação e à sustentabilidade. Que ele sirva como uma ferramenta essencial para aqueles que acreditam no poder da ciência para transformar a realidade e para construir um futuro em que a produção de alimentos caminhe de mãos dadas com a conservação ambiental.

Os Editores

Apresentação

Ao completar 50 anos, a Embrapa Pecuária Sudeste reafirma seu compromisso com a sustentabilidade e a inovação na agricultura e pecuária. Ao longo dessas cinco décadas trabalhou em soluções para os desafios da produção pecuária na região Sudeste e buscou aliar produtividade, rentabilidade e conservação ambiental, atenta às expectativas e transformações da sociedade.

Os 20 anos de pesquisa em integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em nosso Centro de Pesquisa representam um ciclo completo de estudos, da implantação inicial à avaliação de longo prazo dos benefícios ambientais, econômicos e sociais dos sistemas integrados. O livro "*Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta: Cultivando o Futuro*" é mais um fruto desse trabalho contínuo e robusto. Além disso, o conteúdo do livro fornece bases técnicas e científicas para apoiar o cumprimento das metas ambientais e climáticas estabelecidas globalmente, alinhando-se a compromissos nacionais como o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC+) e o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPD). Compromissos internacionais também são alinhados ao tema, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ODS-ONU).

O seu conteúdo reforça a necessidade de integrar a segurança alimentar com a mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE), estratégias de adaptação às mudanças climáticas, preservação do solo e água, e conservação da biodiversidade.

O livro não é apenas um registro histórico, mas sim um guia técnico-científico abrangente que a Embrapa Pecuária Sudeste tem a honra de entregar à sociedade brasileira com o conhecimento acumulado em 20 anos de pesquisas, transferência de tecnologias e inovação em ILPF, comprovando que é possível, sim, unir alta produtividade e conservação ambiental.

Que esta obra inspire a adoção das inovações sustentáveis no campo, alcançando o impacto esperado e necessário! Parabéns a todos os que contribuíram para este legado!

Alexandre Berndt
Chefe-geral da Embrapa Pecuária Sudeste

John Deere e Rede ILPF: Parcerias que Transformam o Agro Brasileiro

A trajetória da John Deere no Brasil é marcada por inovação e compromisso com a sustentabilidade. Desde o início, a empresa se posiciona como protagonista na evolução do agronegócio, investindo em pesquisa, tecnologia e alianças estratégicas que impulsionam modelos produtivos integrados e regenerativos. É nesse contexto que a John Deere apresenta sua atuação em prol da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), sistema que redefine o futuro da agricultura tropical.

Reconhecendo o potencial transformador da ILPF, a John Deere foi uma das fundadoras da Rede ILPF, ao lado de empresas visionárias e instituições de pesquisa. A Rede ILPF tornou-se referência nacional ao reunir esforços de diferentes setores para disseminar conhecimento técnico e acelerar a adoção de práticas sustentáveis no campo. Sua força está na capacidade de mobilizar parcerias e levar inovação diretamente às regiões onde o impacto é mais necessário.

Por meio de projetos como o Integra, a Rede ILPF promove capacitação, assistência técnica e transferência de tecnologia, conectando produtores rurais, extensionistas e pesquisadores. Essa atuação descentralizada permite que o conhecimento sobre ILPF chegue a diferentes estados e perfis de propriedades, adaptando soluções às realidades locais e ampliando os benefícios do sistema integrado.

A Fazenda Modelo Santa Brígida, em Ipameri (GO), é um exemplo emblemático dessa transformação. Com apoio da Rede ILPF, da Embrapa, da Universidade Estadual de Goiás e da John Deere, a propriedade passou por um processo de recuperação de áreas degradadas, diversificação produtiva e implementação de práticas inovadoras. Hoje, Santa Brígida integra lavouras, pecuária intensiva e manejo florestal, demonstrando ganhos agronômicos, econômicos, sociais e ambientais. O sucesso da fazenda inspira outros produtores e serve como vitrine para as ações da Rede ILPF em todo o país.

Como parceira estratégica da Rede ILPF, a John Deere potencializa esse movimento ao oferecer soluções tecnológicas de ponta, máquinas conectadas e agricultura de precisão adaptada às condições tropicais do Brasil. O compromisso da empresa vai além do fornecimento de equipamentos: envolve o cultivo de conhecimento, inovação e parcerias que preparam o futuro do agro.

No campo das parcerias, destaca-se também a colaboração com a The Nature Conservancy (TNC), voltada à promoção da agricultura regenerativa e à transição de pequenos e médios produtores para sistemas integrados. Entre 2022 e 2025, essa iniciativa beneficiou diretamente 109 agricultores e 95 propriedades no Vale

do Araguaia, com acompanhamento técnico e capacitação, reforçando o compromisso da John Deere e da Rede ILPF com a sustentabilidade.

Mais do que produzir máquinas e soluções, a John Deere cultiva conhecimento, inovação e parcerias que transformam o presente e preparam o futuro do agro. Cada hectare recuperado, cada produtor capacitado e cada tecnologia aplicada representam avanços concretos rumo a uma agricultura mais eficiente, resiliente e regenerativa, que cuida da terra e das pessoas que dela dependem.

Ao apresentar sua trajetória, a John Deere reafirma seu papel como agente de transformação, impulsionando a disseminação da ILPF por meio da Rede ILPF e de parcerias estratégicas. A ILPF, impulsionada por colaboração, tecnologia e dedicação, é o caminho para um agro mais produtivo, justo e ambientalmente responsável.



Figura 1. Fazenda Santa Brígida, em 2006, antes da adoção do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF).
Crédito: Embrapa.



Figura 2. Fazenda Santa Brígida, em 2019, após a adoção do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), evidenciando a transformação da paisagem e do uso do solo.
Crédito: John Deere.



Figura 3. Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) em operação na Fazenda Santa Brígida, com componente florestal integrado à produção pecuária, em 2015.

Crédito: Fabiano Bastos.



Figura 4. Vista aérea da Fazenda Santa Brígida após a consolidação do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), destacando a organização espacial das áreas produtivas e a integração entre lavoura, pecuária e floresta, em 2019.

Crédito: John Deere.

Rede ILPF: 20 Anos de Cooperação pelo Agro Sustentável

Há vinte anos, um novo capítulo começou a ser escrito na história da agropecuária brasileira. Um capítulo que uniu ciência, inovação e propósito. E, desde suas primeiras linhas, a Rede ILPF tem a honra de estar ao lado da Embrapa, parceira desde o início dessa jornada que transformou a forma de produzir no campo e projetou o Brasil como referência mundial em agricultura sustentável.

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nasceu da observação atenta da natureza e da coragem de quem acredita que produzir e preservar podem, sim, caminhar juntos. Surgiu como resposta inteligente e sistêmica a um desafio que o país enfrentava: a necessidade de recuperar pastagens degradadas, elevar a produtividade e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais da produção.

Sob a liderança visionária de pesquisadores da Embrapa, entre eles o pioneiro João Kluthcouski, a ILPF ganhou forma nos experimentos realizados no Cerrado. A ideia era simples e, ao mesmo tempo, revolucionária: integrar lavouras, pastos e florestas em um mesmo espaço, de maneira planejada e harmônica. O que se via no campo não era apenas o resultado de um consórcio produtivo, mas o início de um novo paradigma, a construção de um modelo de agricultura regenerativa e de baixo carbono.

A transição do campo experimental para o campo produtivo teve um marco simbólico na Fazenda Santa Brígida, em Ipameri (GO), onde a família Porto Costa apostou na ciência e transformou teoria em prática. Aquela propriedade se tornou vitrine viva da ILPF, provando, com resultados concretos, que era possível recuperar o solo, diversificar a renda e aumentar a produtividade com equilíbrio ambiental.

Mas toda transformação, para se consolidar, precisa de uma rede. Foi com esse espírito de cooperação que, em 2006, a Rede ILPF foi idealizada, reunindo a Embrapa e empresas do setor produtivo em uma aliança inédita. Desde o início, o propósito foi claro: unir forças, compartilhar conhecimento e ampliar o alcance do sistema em todo o território nacional.

Desde então, a Rede ILPF tem atuado como articuladora de um grande movimento em prol da sustentabilidade no agro brasileiro. Uma parceria que se traduz em ações concretas: capacitações, dias de campo, projetos regionais, implantação de Unidades de Referência Tecnológica e de Transferência (URTs e UDTs), difusão de conhecimento científico e fortalecimento das políticas públicas voltadas a uma produção de baixo carbono.

Ao longo dessas duas décadas, a sinergia entre pesquisa e prática, entre instituição e produtor, foi essencial para o amadurecimento e a expansão da ILPF. Hoje, o sistema está presente em mais de 17 milhões de hectares e tem potencial para até 159 milhões de hectares de pastagens em todo o país. Mais do que números, esses resultados representam a mudança de mentalidade no campo, a consciência de que produtividade e conservação não são opostas, mas complementares.

A ILPF é, antes de tudo, um sistema de equilíbrio. Ela devolve ao solo sua vitalidade, melhora a eficiência no



Crédito: Gabriel Rezende Faria.

uso de insumos, diversifica as fontes de renda e reduz riscos climáticos e econômicos para o produtor. É uma resposta brasileira aos desafios globais da segurança alimentar, da mitigação das mudanças climáticas e da transição para uma economia verde.

Para a Rede ILPF, a trajetória conjunta com a Embrapa é motivo de profundo orgulho. Juntas, construímos uma história que une ciência e campo, técnica e sensibilidade, produtividade e sustentabilidade. Uma parceria que ultrapassa fronteiras institucionais e se consolida como referência internacional de inovação colaborativa.

Cada avanço alcançado, cada nova propriedade que adota o sistema, cada produtor que se torna multiplicador dessa ideia, tudo isso reflete o poder transformador da cooperação. Porque o verdadeiro legado da ILPF não está apenas nas tecnologias desenvolvidas ou nos hectares recuperados, mas nas pessoas que acreditaram que o futuro do agro se constrói com responsabilidade e visão de longo prazo.

O livro, *Integração Lavoura-Pecuária Floresta: Cultivando o Futuro*, é um tributo a essa jornada. Ele retrata não apenas a história de um sistema produtivo, mas a evolução de um conceito: o de uma agricultura que se renova a cada safra, aprendendo com a terra e devolvendo a ela mais do que retira.

A Rede ILPF reconhece e agradece à Embrapa por sua liderança técnica e científica, por ser o alicerce desse movimento que inspira produtores, empresas e instituições em todo o país. Juntas, mostramos que o conhecimento compartilhado é a semente mais fértil que se pode plantar.

Ao celebrar estas duas décadas, reafirmamos nosso compromisso com o futuro. Seguiremos fortalecendo essa parceria, levando o sistema ILPF a novas regiões, promovendo a regeneração ambiental e impulsionando uma agropecuária mais competitiva, sustentável e inclusiva.

Afinal, a ILPF é mais do que uma técnica: é um propósito. É a expressão de um agro que acredita na ciência, que valoriza o produtor e que se compromete com as próximas gerações. É a solução sustentável do agro brasileiro — e, acima de tudo, o símbolo do poder transformador da união entre quem pesquisa e quem produz.

Syngenta: Juntos pelo Futuro da Agricultura Sustentável

Impulsionar uma agricultura mais produtiva e sustentável é um dos propósitos da Syngenta. Acreditamos que a inovação e a sustentabilidade são o caminho para superarmos os desafios do futuro e construirmos um legado positivo para as próximas gerações. Por isso, sentimos um imenso orgulho em sermos parceiros da Rede ILPF desde a sua concepção.

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), como o próprio nome sugere, agrega diferentes sistemas produtivos em uma mesma área, contribuindo com benefícios mútuos a partir da interação entre eles. A técnica compõe um dos pilares da agricultura sustentável, colocando o setor na linha de frente dos esforços para o combate às mudanças climáticas.

Sistemas integrados como este contribuem para que a agricultura brasileira combine diferentes atividades produtivas em um único espaço, gerando vantagens ambientais, como a fixação de nutrientes no solo, o aumento do sequestro de carbono e a mitigação da emissão de gases de efeito estufa, além de impulsionar



Figura 1. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), Itiquira/MT.
Crédito: Gabriel Moura, Coordenador do Programa REVERTE® da Syngenta.



Figura 2. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), Itiquira/MT.
Crédito: Gabriel Moura, Coordenador do Programa REVERTE® da Syngenta.

melhorias sociais e econômicas. Isso porque a ILPF estimula a qualificação profissional, diminui a sazonalidade da mão de obra, reduz custos e é adaptável para áreas de todos os tamanhos, em qualquer bioma.

A prática da ILPF também ajuda a reduzir a necessidade de abertura de novas áreas para fins agropecuários, otimiza e intensifica a ciclagem de nutrientes no solo, promove melhoria do bem-estar animal, principalmente em decorrência do maior conforto térmico, aumenta a biodiversidade e o controle dos processos erosivos por meio da manutenção da cobertura do solo e, ainda, eleva a produtividade de áreas degradadas quando aliada a práticas como o plantio direto.

Ademais, gera benefícios para o produtor que, além de ser mais eficiente na utilização de recursos, como solo e insumos, ainda obtém estabilidade econômica, com diminuição de incertezas e riscos (climáticos e de mercado), devido à diversificação da produção e à redução de custos a médio e longo prazo.

Dentre os benefícios sociais que ganham força com a adoção da ILPF, destacamos a geração de empregos diretos e indiretos, o aumento e a melhor distribuição da renda, o crescimento da competitividade do agronegócio brasileiro e a contribuição para a segurança alimentar do país.

É importante reforçar que, até algumas décadas atrás, produzir grãos, cultivar florestas e criar gado na mesma área era algo improvável. Atualmente, isso é possível graças aos avanços tecnológicos que ajudam na superação dos desafios impostos pela agricultura tropical.

A estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta prova que é possível produzir com mais sustentabilidade, gerando excelentes benefícios para o agricultor e para o meio ambiente. É por isso que a Syngenta seguirá incentivando a adoção de práticas que corroborem com uma agricultura cada vez mais sustentável.

Sumário

31 **Capítulo 1**
Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil

57 **Capítulo 2**
Integração Lavoura-Pecuária-Floresta em São Paulo

73 **Capítulo 3**
Sistemas Integrados de Longa Duração da Embrapa Pecuária Sudeste

89 **Capítulo 4**
Infraestrutura Digital para Pesquisa *on-farm*

115 **Capítulo 5**
Microclima

129 **Capítulo 6**
Solos

153 **Capítulo 7**
Produção Vegetal: Árvores, Pastagens e Culturas Anuais

169 **Capítulo 8**
Produção Animal e Mitigação de Metano Entérico

181 **Capítulo 9**
Conforto e Bem-estar Animal

201 **Capítulo 10**
Biodiversidade de Artrópodes e Serviços Ambientais

219 **Capítulo 11**
Sequestro de Carbono

239 **Capítulo 12**
Viabilidade Econômica

253 **Capítulo 13**
Desempenho Ambiental pela Síntese em Emergia

267 **Capítulo 14**
Serviços Ecossistêmicos e Ambientais

287 **Capítulo 15**
Geotecnologias

309 **Capítulo 16**
Modelagem do Crescimento e Desenvolvimento de Plantas

327 **Capítulo 17**
Estratégias de Comunicação

339 **Capítulo 18**
Transferência de Tecnologia

353 **Capítulo 19**
Indicadores Econômicos, Ambientais e Sociais para Diagnóstico e Monitoramento de Sistemas Integrados

369 **Capítulo 20**
Inovação e Sustentabilidade

Capítulo 1

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil

Luiz Adriano Maia Cordeiro, Priscila de Oliveira; Emerson Borghi, Salete Alves de Moraes, Tadário Kamel de Oliveira, Renato Serena Fontaneli, Maurel Behling, Roberto Giolo de Almeida, Domingos Sávio Campos Paciullo



RESUMO: A integração lavoura-pecuária (ILP) proporciona diversos benefícios, como aumento da produtividade vegetal e animal, bem como melhorias na qualidade ambiental. A inserção do componente florestal aos sistemas de integração proporcionou aumento na diversificação e maior potencial produtivo. O conceito da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) engloba as modalidades de integração com e sem componente florestal. Historicamente, a Embrapa desenvolveu diversos sistemas de ILP, que estão em adoção nos diversos biomas brasileiros. Por ter inúmeros benefícios, os sistemas de integração têm adoção em crescimento e compõem políticas públicas ligadas à produção agropecuária sustentável e de baixa emissão de carbono.
Palavras-chave: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); Integração Lavoura-Pecuária (ILP); Sistemas Sustentáveis de Produção Agropecuária.

ABSTRACT: Integrated crop-livestock integration (ICL) offers several advantages, such as enhanced plant and animal productivity, as well as significant improvements in environmental quality. The incorporation of a forestry component into these systems has increased diversification and enhanced productive potential. The concept of the Integrated crop-livestock-forest integration (ICLF) strategy encompasses integration modalities both with and without the forestry component. Historically, Embrapa has developed numerous ICL systems that are now being adopted across various Brazilian biomes. Due to their multiple benefits, these integration systems are experiencing accelerated adoption and are included in public policies aimed at sustainable, low-carbon agricultural production.
Keywords: Integrated Crop-Livestock-Forest (ICLF); Integrated Crop-Livestock (ICL); Sustainable Agricultural Production Systems.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-1

1.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade enfrenta desafios cada vez maiores para produzir alimentos, fibras, energia, produtos madeireiros e não madeireiros de forma compatível com a disponibilidade de recursos naturais, em especial solo e água. Por isso, são intensos os apelos para que seja difundida em todo o mundo a concepção da agricultura sustentável (Cordeiro et al., 2015a).

Com o aumento da demanda por alimentos e a evolução tecnológica, a atividade agrícola moderna passou a se caracterizar por sistemas padronizados e simplificados de monocultura. Além disso, com a expansão da fronteira agrícola, manejo mecanizado do solo e o uso de agroquímicos e irrigação, as atividades agropecuárias passaram a ser realizadas de maneira intensificada, independente e dissociada. Esse modelo da produção predomina em todo o mundo; entretanto, tem mostrado sinais de saturação, em virtude da elevada demanda por energia e por recursos naturais (Balbino et al., 2011a).

A integração lavoura-pecuária (ILP) proporciona benefícios recíprocos entre a lavoura e a pecuária, reduzindo as causas da degradação física, química e biológica do solo, resultantes de cada uma das explorações (Kluthcouski; Stone, 2003). A introdução do componente florestal aos subsistemas lavouras e pastagens representa um avanço da ILP, que evoluiu para o conceito mais amplo de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). São inúmeras as possibilidades de combinação espaço-temporal entre os componentes agrícola, pecuário e florestal, que se caracterizam pelo alto potencial produtivo e por proporcionarem melhorias na qualidade ambiental (Balbino et al., 2011a, 2011b, 2012).

A adoção da ILP ou ILPF possibilita a melhoria da produtividade, da qualidade dos produtos e aumento da renda das atividades agropecuárias, integrando as explorações de lavoura, pecuária e/ou floresta em áreas já desmatadas, como alternativa aos monocultivos tradicionais (Kluthcouski et al., 2015; Salton et al., 2015a). Além disso, os sistemas integrados têm alta capacidade de sequestro de carbono e mitigação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Salton, 2005; Assad et al., 2015, 2019; Gontijo Neto et al., 2018; Souza et al., 2019; Bernardi et al., 2023).

Neste capítulo, é apresentado o atual cenário da ILPF no Brasil, partindo do conceito e modalidades até aspectos do histórico, adoção, sistemas, principais benefícios, políticas públicas, futuro e desafios.

1.2 CONCEITO E MODALIDADES DE ILPF

Entende-se por "integração" o ato ou efeito de integrar ou tornar inteiro, ou seja, é a combinação de partes isoladas para a formação de um conjunto que trabalha como um todo. Um dos usos dessa palavra no Brasil é para identificar sistemas de produção agropecuária que combinam as atividades agrícola, pecuária e/ou florestal na mesma área (Cordeiro et al., 2015a).

Alvarenga e Noce (2005) descrevem a ILP como a diversificação, a rotação, a consorciação ou a sucessão das atividades de agricultura e de pecuária dentro da propriedade rural, de forma harmônica, em um mesmo sistema, para que haja benefícios para ambas. A ILP possibilita que a área seja explorada economicamente durante todo o ano, o que favorece o aumento da oferta de grãos, de carne e de leite, a um custo mais baixo, em virtude do sinergismo entre lavoura e pastagem.

Segundo Balbino et al. (2011b), a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é definida como uma estratégia de produção sustentável que integra

Os sistemas de integração podem ser classificados em quatro modalidades:

1) Integração lavoura-pecuária (ILP) ou sistema agropastoril – sistema de produção que integra os componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos.

2) Integração pecuária-floresta (IPF) ou sistema silvipastoril – sistema de produção que integra os componentes pecuário e florestal em consórcio.

3) Integração lavoura-floresta (ILF) ou sistema silviagrícola – sistema de produção que integra os componentes florestal e agrícola em consórcio.

4) Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou sistema agrossilvipastoril – sistema de produção que integra os componentes agrícola, pecuário e florestal em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área.

Fonte: Balbino et al. (2011b).

atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais, realizadas na mesma área, em consórcio, em sucessão ou rotação de culturas, e busca efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental, valorização do homem e viabilidade econômica.

De acordo com Kluthcouski et al. (2015), também é possível a identificação de duas categorias: sistemas sem componente florestal (ou seja, a ILP); e sistemas com componente florestal (ou seja, a IPF, a ILF e a ILPF). Independentemente da forma como são classificados, trata-se de sistemas mistos de produção agropecuária com a diversificação de atividades na mesma área ao longo do tempo.

Nesses sistemas, pode ocorrer um consórcio de uma cultura anual com uma espécie forrageira até que, após a colheita da cultura anual, a forrageira predomine, e o uso da terra passe a ser pastoril e não mais agrícola. Nessa fase, o sistema muda de *status* e passa a ser uma sucessão, no sistema agropastoril (ILP). Há ainda o cultivo consorciado com semeadura defasada, como é o caso das forrageiras semeadas tardiamente (em sobressemeadura), por exemplo, na cultura da soja. Em sistemas com a presença do componente florestal, pode ocorrer consórcio de uma cultura anual com árvores, e nessa fase o sistema será silviagrícola (ou ILF). Após a colheita da cultura anual e início do pastejo, o sistema será silvipastoril (ou IPF). Nessa dinâmica é que se configura o sistema agrossilvipastoril (ou ILPF). As árvores não estarão em sucessão, nem em rotação com as lavouras e/ou pastagens, mas, sim, em consórcio (Kluthcouski et al., 2015).

Tabela 1.1. Alternativas de abertura e manejo de Cerrado com diferentes sequências de cultivos agrícolas e pastagens, entre os anos de 1976-1977, 1977-1978, 1978-1979 e 1979-1980, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), Planaltina-DF.

Sequência	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980
S1	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem
S2	Arroz + Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem
S3	Arroz	Arroz	Arroz + Pastagem	Pastagem
S4	Soja	Soja	Milho	Soja

Fonte: Embrapa (1979) e Vilela et al. (2022).

1.3 HISTÓRICO DA ILPF

Entre os anos de 1975 e 1976, foi implantado na Embrapa Cerrados um "experimento síntese" com alternativas de abertura e manejo de áreas de Cerrado. Foi realizada aplicação de calcário e dois níveis de fósforo, e quatro sequências de cultivos, conforme se observa na Tabela 1.1 (Embrapa, 1979; Vilela et al., 2022). É uma experiência científica pioneira da história da Embrapa com os princípios da Integração Lavoura-Pecuária (ILP). Parte dessas informações também foi publicada por Santos (1978).

As instituições ligadas ao Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária (SNPA) pesquisam e recomendam sistemas agropastoris e agrossilvipastoris há muitos anos, pois nas décadas de 1980 e 1990 desenvolveram e aperfeiçoaram tecnologias para recuperação de pastagens degradadas (Kluthcouski et al., 1991; Macedo, 1993; Oliveira, et al., 1998a, 1998b, 1999); sistemas de ILP (Lustosa, 1998; Kluthcouski et al., 2003; Moraes et al., 2002); pesquisas sobre sistemas silvipastoris ou IPF (Baggio; Schreiner, 1988; Baggio; Carpanezzi, 1989; Montoya Vilcahuaman; Baggio, 1992; Schreiner, 1994; Montoya Vilcahuaman et al., 1994; Baggio; Porfírio-da-Silva, 1998).

Desde os anos 1990, Yokoyama et al. (1999) já consideravam que a recuperação de pastagens cultivadas por meio da ILP apresenta uma vantagem comparativa em relação ao método tradicional sem agricultura, devido à receita gerada pelo grão, que cobre parte dos custos da formação da pastagem. Havia evidências de que a implementação e manutenção da pastagem cultivada com ILP, em associação com arroz ou milho, já era considerada uma atividade economicamente viável.

Em 1991, foi implantado um experimento na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF, que está sendo avaliado até hoje, em que os tratamentos foram constituídos pela combinação de sistemas (pastagem de gramínea em monocultivo contínua, pastagem consorciada contínua, rotação de cultura anual/pastagem consorciada, rotação de pastagem consorciada/cultura anual, cultura anual contínua e Cerrado nativo), diferentes níveis de fertilidade e dois métodos de preparo do solo. Atualmente, além das variáveis respostas tradicionais relacionadas a produtividades dos sistemas e ao solo, estão sendo avaliados o estoque de carbono no solo, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelo componente agrícola e pelos animais, a fauna do solo,

os bioindicadores de qualidade do solo (Vilela et al., 1999; Vilela et al., 2008; Vilela et al., 2022).

Historicamente, nas terras baixas do Sul do País, as áreas de cultivos de arroz irrigado eram também utilizadas para pecuária de corte, em rotação com pastagens. Também na região Sul, áreas de planalto ocupadas com "campos nativos", com a disponibilidade de herbicidas e semeadoras, foram substituídas por lavouras de soja em Sistema Plantio Direto (SPD). No Brasil Central, a Embrapa Arroz e Feijão lançou o Sistema Barreirão, que é composto por um conjunto de tecnologias e práticas de recuperação de áreas de pastagens em degradação, embasadas no consórcio de arroz com pastagem. Com a expansão do SPD e a maior oferta de máquinas e herbicidas, foram desenvolvidas práticas de dessecação de pastagens e semeadura de soja, tendo resultado no desenvolvimento de sistemas de ILP com rotação lavoura-pastagem (Balbino et al., 2011a; Kluthcouski et al., 1991, 2015).

No início dos anos 2000, consolidou-se o Sistema Santa Fé (Kluthcouski et al., 2000), que possibilita a produção consorciada de culturas de grãos, especialmente milho, sorgo, milheto e arroz com forrageiras tropicais, principalmente as do gênero *Brachiaria*, cujos principais objetivos são a produção de forragem para a entressafra e a produção de palhada em quantidade e qualidade para o SPD. Todas essas iniciativas proporcionaram, em diversos ambientes, o desenvolvimento de formas de integrar a pecuária à produção de grãos (Borghi; Crusciol, 2007; Kluthcouski; Aidar, 2003; Kluthcouski et al., 2015).

Posteriormente, muitos trabalhos foram desenvolvidos para se determinar as recomendações técnicas da implantação e manejo de árvores em sistemas integrados (IPF, ILF e ILPF), por exemplo, Porfírio-da-Silva et al. (2010, 2015), Andrade et al. (2012), Wruck et al. (2015), Pulrolnik et al. (2019), Pezzopane et al. (2021) e Muller et al. (2021a, 2021b).

Diferentes centros de pesquisa da Embrapa implantaram experimentos de longa duração para avaliação científica de sistemas de ILP e de ILPF em diversas regiões, como na Embrapa Gado de Corte (Kichel et al., 2014; Rosa; Alva, 2017), Embrapa Florestas (Porfirio-da-Silva, 2012), Embrapa Agropecuária Oeste (Salton et al., 2015b), Embrapa Gado de Leite (Paciullo, et al., 2021), Embrapa Pecuária Sudeste (Oliveira et al., 2022), Embrapa Milho e Sorgo (Alvarenga et al., 2024), Embrapa Agrossilvipastoril (Embrapa Agrossilvipastoril, 2024), entre outras.

1.4 ADOÇÃO DA ILPF

O potencial de adoção de sistemas de integração em diferentes ecossistemas brasileiros está condicionado a diversos fatores, de acordo com Vilela et al. (2001), que incluem: disponibilidade de solos favoráveis; infraestrutura para produção e armazenamento da produção; recursos financeiros próprios ou acesso a crédito; domínio da tecnologia para produção de grãos e pecuária; acesso a mercado para compra de insumos e comercialização da produção; acesso a assistência técnica; e possibilidade de arrendamento da terra ou de parceria com produtores de grãos.

Os sistemas de integração envolvem a coexistência espaço-temporal de diferentes componentes e atividades (agrícola, pecuária e florestal), sendo, portanto, sistemas mistos, mais complexos e mais dependentes de tecnologia e conhecimentos. Para aumentar a adoção pelo setor produtivo, faz-se necessária maior interação entre diferentes atores (pesquisadores, professores, técnicos, empresários e produtores rurais), visando produzir inovações apropriadas. Isso deve contemplar a capacitação contínua de multiplicadores e a avaliação dos processos e das atividades empregados na transferência de conhecimento e tecnologia, baseada em demandas e considerações a partir da prospecção junto aos atores envolvidos (Cordeiro et al., 2015b).

Uma das formas de proporcionar um adequado aprendizado de técnicos e de produtores rurais é a criação de Unidades de Referência Tecnológica (URT), as quais são modelos físicos de sistemas integrados de produção, instalados em área pública ou privada, visando à validação, demonstração e transferência de tecnologias geradas, adaptadas e/ou recomendadas para adoção de sistemas de ILPF (Balbino et al., 2011c).

Porém, existem muitos entraves para ampla adoção de sistemas de integração, entre os quais se destacam: i) receio de envolvimento com a produção de algo novo: por exemplo, seria bastante complexo, sob vários aspectos (técnico, infraestrutura, comercialização, acesso ao crédito), para um pecuarista iniciar a produção de soja, principalmente no que se refere ao gerenciamento do novo modelo de negócio; e ii) superado o receio, ao decidir pela adoção dos sistemas de ILP ou IPF, ILF e ILPF, pode haver algumas dificuldades locais, como falta de mão de obra qualificada, disponibilidade de insumos antes não utilizados, mas principalmente a necessidade de adaptação de todos os envolvidos. Como forma de solucionar essas difi-

culdades, pode-se indicar, na fase de aprendizado, a associação entre produtores, ou seja, pecuarista e agricultor, por meio de arrendamentos ou parcerias (Salton et al., 2015a).

Uma pesquisa mostrou que a área de adoção com sistemas de integração no Brasil abrangia, em 2016, 11,5 milhões de ha. Neste estudo, os Estados que se destacavam eram: Mato Grosso do Sul, com 2,0 milhões de ha; Mato Grosso, com 1,5 milhão de ha; Rio Grande do Sul, 1,4 milhão de ha; Minas Gerais, com 1,0 milhão de ha; e Santa Catarina, com 680 mil ha. No âmbito dos produtores rurais com atuação predominante na pecuária e que adotam a estratégia, 83% utilizavam o sistema de ILP, 9% ILPF e 7% IPF (Embrapa, 2016; Rede ILPF, 2021).

Segundo Manzatto et al. (2020), a expansão acumulada da área de adoção de ILPF para o período 2010 a 2016 foi da ordem de 5,83 milhões de ha, passando de 6,78 milhões de ha para 12,61 milhões de ha, chegando a 146% da meta de expansão estabelecida na primeira fase do Plano ABC (Brasil, 2012) para 2020.

Estudo realizado por Polidoro et al.[1] fez uma projeção de crescimento de área de ILPF em cenários com base nos dados de pesquisa publicados pela Embrapa (2016). Os autores avaliaram que a área de ILPF no Brasil evoluiu (no Cenário 2) de 5,51 milhões de ha, em 2010, para 16,27 milhões de ha, em 2020, perfazendo uma expansão absoluta de 10,76 milhões de hectares[2]. O potencial de adoção se amplia ao considerar os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no "Plano ABC+ (2020-2030)", pois uma das metas é alcançar mais 10 milhões de hectares com sistemas de ILPF até 2030 (Brasil, 2021a; 2021b).

1.5 SISTEMAS DE ILPF E INOVAÇÕES

Sistema Barreirão: foi o primeiro sistema de ILP estudado e validado pela Embrapa, e é composto por um conjunto de tecnologias de recuperação de pastagens degradadas, embasadas no preparo do solo com grade e arado de aiveca, correção e adubação e plantio do arroz (e outras culturas) consorciado com forrageiras (Kluthcouski et al., 1991; Oliveira et al., 1998a, 1998b).

Sistema Santa Fé: fundamenta-se na produção consorciada de culturas de grãos, especialmente milho e sorgo, com forrageiras tropicais, principalmente do gênero *Brachiaria* ou *Panicum* de porte baixo, em áreas de lavoura com solo devidamente corrigido. O sistema foi desenvolvido com base nos resultados obtidos na Fazenda Santa Fé, em Santa Helena de Goiás-GO (Kluthcouski et al., 2000; Kluthcouski; Aidar, 2003).

Sistema Santa Brígida: outro sistema de ILP, desenvolvido com foco em diversificação de palhada e/ou pastagem, desenvolvido e validado na fazenda homônima, em Ipameri-GO. Constitui um consórcio triplo entre milho, braquiárias e uma espécie leguminosa, especialmente o guandu-anão, com os objetivos principais de produzir forragem mais rica em proteína, aumentar a fixação biológica do nitrogênio (FBN) e reduzir a necessidade de fertilizante nitrogenado mineral no cultivo em sucessão (Oliveira et al., 2010).

Sistema São Mateus: foi desenvolvido na região do Bolsão Sul-Mato-Grossense com solos arenosos, que apresentam < 15% de argila, fruto de um trabalho conjunto da Embrapa e da Fazenda São Mateus, em Selvíria-MS. Baseia-se na antecipação da correção química e física do solo e do cultivo de soja em SPD para amortizar os custos da recuperação de pastagens degradadas na ILP. No início do período chuvoso, implanta-se a pastagem temporária e, em seguida, utiliza-se a pastagem por 6 a 9 meses. Logo após o início das chuvas, procede-se com a dessecação da pastagem com herbicida e, cerca de 20 dias após, efetua-se a semeadura em SPD da soja sobre a palhada da pastagem dessecada (Salton et al., 2013). A principal vantagem do Sistema São Mateus é a utilização da pastagem de boa qualidade por 6 a 9 meses antes do plantio das lavouras de grãos, podendo produzir 8 @/ha a 12 @/ha de equivalente carcaça de carne, aumentando a rentabilidade da pecuária, como também proporcionar a adequação química e física do solo. Além disso, a produção de palhada para o SPD reduz os riscos climáticos, aumentando a produtividade da soja em 3 sacas a 12 sacas/ha em relação ao sistema tradicional, podendo obter lucro já no primeiro ano (Zimmer et al., 2015).

Sistema Boi Safrinha: é definido por Vilela et al. (2015, 2017) como aquele em que propriedades rurais especializadas em lavouras de grãos adotam as gramíneas forrageiras para melhorar a cobertura de solo

[1] POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C.; RODRIGUES, R. A. R.; CESÁREO, F. V.; ANDRADE, A. G.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Authorea**, 2020. No prelo. DOI: http://doi.org/10.22541/au.158750264.42640167.

[2] POLIDORO, op. cit.

para o SPD e, na entressafra, utilizam essa forragem na alimentação de bovinos na estação seca (inverno). É uma pastagem de curta duração num período em que, normalmente, ocorre déficit de forragem. Em analogia à segunda safra de milho, esse sistema tem sido denominado de "boi safrinha", tendo como variantes os termos "safrinha de boi" ou "pasto safrinha".

Sistema Gravataí de ILP: semelhante à modalidade "boi safrinha", tem a forrageira e a pecuária como principais atividades na segunda safra. Consiste no consórcio do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) com gramíneas do gênero *Brachiaria*, como *B. ruziziensis* e *B. brizantha* cvs. BRS Paiaguás e BRS Piatã. Tem como característica o grande acúmulo de forragem de alta qualidade no período seco do ano. Além disso, contribui para a melhoria do perfil do solo em áreas de lavoura com solos de textura média e/ou argilosa na sucessão com a soja (Wruck et al., 2018).

Sistema São Francisco: consiste na sobressemeadura de sementes de pastagens, notadamente do gênero *Panicum*, em culturas agrícolas no final do ciclo e antes da colheita, que teve origem em uma prática adotada por alguns produtores do Município de Quirinópolis-GO. Utiliza-se a sobressemeadura de capim-mombaça em soja para recuperar a produtividade de pastagens degradadas. A validação desse sistema de sobressemeadura do capim-mombaça na soja foi realizada com avião agrícola entre estádios fenológicos R6 (grão verde ou vagem cheia) e R7 (início da maturação, "soja loirando"). Após a colheita da soja, o pasto fica estabelecido. Em uma propriedade rural em que o sistema foi testado, com 75 dias de pastejo na entressafra e taxa de lotação de 2,9 UA/ha, o ganho diário de bovinos mestiços em terminação foi de 0,6 kg/animal/dia e 123 kg/ha (Vilela et al., 2021).

Sistema Pontal: é sustentado por três pilares: i) ILP; ii) manejo de pastagens que possibilita maior taxa de lotação no período chuvoso; e iii) estação de monta invertida que viabiliza o nascimento de bezerros na seca. As áreas de lavoura são semeadas com forrageiras para garantir a formação de pastos pós-lavoura, e a silagem produzida com o capim-mombaça, plantado em áreas de soja que não possuem cerca e não podem ser pastejadas. Com 50% da área com soja na safra, todo o rebanho fica nos 50% restantes, com taxa de lotação de até 3,0 UA/ha. A partir de março, com os pastos formados após a colheita da soja, 100% da área passa a ser ocupada pela pecuária (Embrapa, 2023).

Sistema Antecipe: uma das inovações mais recentes em sistemas ILP refere-se ao cultivo intercalar antecipado de espécies forrageiras nas entrelinhas da soja. Nesse consórcio, a forrageira pode ser semeada no estádio de desenvolvimento V_4 (Machado et al., 2023) ou no estádio R_5 (Karam et al., 2020) da soja, de acordo com a escala fenológica descrita em Farias et al. (2007). Entre as vantagens desses sistemas, destacam-se: i) possibilidade de consórcio entre espécies forrageiras com a soja; ii) antecipação da semeadura da forrageira antecedendo a colheita da soja, aproveitando o final do período de verão e disponibilizando forragem de qualidade e quantidade no período de outono-primavera; iii) formação da pastagem ao final do período de verão/início do outono; e iv) utilização da pastagem em quantidade e com elevado valor nutritivo na época de maior escassez de alimento (inverno). Resultados obtidos em Mato Grosso do Sul com o cultivo intercalar antecipado de *P. maximum* cv. Tamani semeado no estádio V4 da soja possibilitou ganhos de até 5@/ha no período de inverno. Em estudo realizado em Sete Lagoas-MG, com a semeadura intercalar no estádio R5 da soja avaliando diferentes espécies forrageiras, foram obtidos ganhos entre 14,4 e 16,8 @/ha/ano. Nesses sistemas, após o uso da forragem para pastejo, a soja pode ser semeada no ano seguinte em SPD.

Sistema Antecipasto: recentemente lançado, é baseado no consórcio de soja com forrageira semeada após a emergência da oleaginosa, nas entrelinhas, possibilitando antecipar a formação de pastagem sem reduzir a produtividade de grãos. Tem como proposta antecipar a formação da pastagem em até 30 dias na ILP, permitindo que o rebanho tenha pasto disponível por mais tempo e na época seca do ano (inverno) (Embrapa, 2025). Segundo Machado et al. (2023), alguns entraves para a consorciação de soja com forrageiras foram solucionados com a defasagem na semeadura do capim, em relação à soja, além da utilização de forrageiras de menor porte e com crescimento inicial mais lento.

Sistema Bacaeri-BoiTeca: lançado em 2025, a Embrapa Agrossilvipastoril introduziu um modelo de ILPF que integra a teca (*Tectona grandis*) e a pecuária como o principal componente. O foco é expandir o cultivo da teca em áreas de bovinocultura de corte, sem substituir pastagens por florestas plantadas. A árvore de teca bem manejada (com desrama periódica) exerce mínima interferência na produtividade da

pastagem, proporcionando serviços ecossistêmicos e renda adicional com madeira de alto valor de mercado para exportação (Embrapa Agrossilvipastoril, 2025). Em 2024, a *Teak Resources Company* (TRC) lançou o plano de negócios "BoiTeca", que usa as tecnologias do Sistema Bacaeri-BoiTeca para expandir a área plantada com teca por meio de sistemas silvipastoris em parceria com pecuaristas do Mato Grosso. Atualmente, estima-se que existam cerca de quatro mil ha com uso desse sistema no Estado. A TRC tem como meta implementar aproximadamente 2.500 ha por ano, totalizando 12.500 ha em cinco anos.

Carne Carbono Neutro (CCN): marca-conceito lançada em 2015, que visa atestar e certificar a carne bovina que tiver seus volumes de emissão de GEE neutralizados durante o processo de produção pela presença de árvores em sistemas de IPF ou ILPF, sendo todos os processos parametrizados e auditáveis (Alves et al., 2015a, 2019).

Carne Baixo Carbono (CBC): outra marca-conceito, é a que visa à valorização de sistemas pecuários de produção de carne capazes de mitigar o metano emitido pelo rebanho durante o processo produtivo a pasto, pelo aumento do estoque de carbono no solo, por meio da adoção de recuperação e manejo sustentável das pastagens e/ou sistemas de ILP, cujo processo produtivo é reconhecido, certificável e auditável (Almeida; Alves, 2020).

Benefícios dos sistemas de integração:

- aumento de produtividade dos componentes;
- melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo em virtude do aumento da matéria orgânica;
- redução da pressão de desmatamento de novas áreas pelo efeito "poupa-terra";
- estabilidade econômica e aumento da renda com a diversificação das atividades;
- redução de custos em médio e em longo prazos;
- redução da vulnerabilidade aos riscos climáticos; e
- melhoria na qualidade de vida do produtor e sua família.

Fonte: Salton et al. (2015a) e Cordeiro et al. (2015a).

1.6 PRINCIPAIS BENEFÍCIOS DA ADOÇÃO DE SISTEMAS DE ILPF (POR BIOMA)

As principais vantagens do uso da ILP são: facilidade na aplicação de práticas de conservação do solo; recuperação de pastagens com custos mais baixos; melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo; controle de pragas, doenças e plantas daninhas; uso eficiente de fertilizantes; maior eficiência na utilização de máquinas, equipamentos e mão de obra; diversificação do sistema produtivo; e aumento da produtividade do agronegócio, tornando-o sustentável em termos econômicos e agroecológicos (Kichel; Miranda, 2001).

Os sistemas de ILP são alternativas para a recuperação de pastagens degradadas e para a agricultura anual, que melhoram a produção de palha para o SPD e as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Macedo, 2009). Esses sistemas também possibilitam a utilização mais eficiente de equipamentos e o aumento de emprego e renda no campo.

Com a adoção da ILPF, é possível o aproveitamento dos fatores de produção e a oferta ambiental entre 90% e 100% do tempo, e assim se pode concluir que tais sistemas se caracterizam como estratégias eficientes de intensificação sustentável do uso dos solos nas regiões tropicais (Salton et al., 2015a; Cordeiro et al., 2015a).

Os sistemas de integração podem ser mais lucrativos por causa da diversificação das atividades econômicas, da redução de custos e dos aumentos de produtividade. Quando se trata de ILP, há aumento de produtividade de grãos cultivados após a pastagem, que também produz mais após o solo ter sido utilizado para cultivo de grãos. E essa pastagem mais produtiva resultará em maior ganho de peso de bovinos ou produção leiteira. Em sistemas com componente florestal (ILPF ou IPF), pode-se adicionar ainda a receita proveniente da comercialização de produtos madeireiros e não madeireiros obtidos no mesmo espaço. Além disso, ao adotar sistemas de ILP ou ILPF, o produtor rural é beneficiado pelo uso mais eficiente dos seus recursos, como terra, máquinas agrícolas e mão de obra. Beneficia-se também em aspectos ambientais, com a

melhoria da qualidade do solo e da água, a possibilidade de redução de uso de agrotóxicos e a melhoria do ambiente produtivo para produção animal. Um aspecto importante a ser considerado é a melhoria da imagem dos produtores, pois conseguem conciliar o aumento da produção com a preservação ambiental (Salton et al., 2015a).

As fazendas de pecuária que adotam a ILP podem se beneficiar da melhor estabilidade de produção de forragem para alimentar o rebanho durante o ano todo. No período das chuvas, as pastagens são mais produtivas, em virtude da melhoria da fertilidade do solo pelas lavouras. No período da seca, além da palhada e dos subprodutos de colheita, os pastos recém estabelecidos permanecem verdes e com qualidade e quantidade para conferir ganhos de peso positivos ao invés de perda de peso, comum nesse período do ano no Cerrado (Vilela et al., 2011).

Diversos trabalhos comprovam o efeito dos sistemas de integração com componente florestal (IPF e ILPF) para o bem-estar animal e conforto térmico, com reflexos positivos na produtividade de carne e de leite. As principais modificações promovidas pela presença de árvores no microclima local em sistemas de ILPF com componente florestal ocorrem sobre a velocidade dos ventos, a temperatura do ar, a pressão de saturação de vapor e a radiação solar incidente. É a combinação desses elementos que afeta, por exemplo, o conforto térmico animal (Alves et al., 2015b).

A principal vantagem da diversificação proporcionada pelos sistemas de ILPF é a redução dos riscos e das incertezas associadas a uma atividade agrícola exclusiva. Com a diversificação, é possível obter ganhos financeiros diretos e indiretos, como: redução dos custos de produção; diminuição da necessidade de insumos externos; e potencial redução dos impactos ambientais negativos da agricultura convencional (Reis et al., 2015). Os sistemas de integração apresentam enorme potencial econômico em virtude da intensificação do uso dos fatores de produção, reduzindo, assim, o custo por unidade de produto (Ryschawy et al., 2012; Reis et al., 2020).

1.6.1 Bioma Amazônia

A estratégia de produção ILPF na Amazônia se expressa pela presença de todas as modalidades de sistemas integrados, com maior destaque para ILP (Skorupa; Manzatto, 2019). De igual forma, Lessa et al. (2006) ressaltam que todas as modalidades de ILPF são reconhecidas na Amazônia. Áreas de recuperação de pastagens de baixa produtividade com plantio de milho configuram experiências iniciais de ILP. Também existem plantios de seringueira com pastagem em sub-bosque em algumas propriedades rurais. Sistemas de ILPF em escala experimental ocorrem em algumas fazendas com agricultura de grãos, no primeiro e no segundo anos, e povoamento florestal com pastagem nos anos seguintes.

De acordo com a plataforma MapBiomas, áreas de pastagens com baixo e moderado vigor na Amazônia somaram em 2024: 11,7 milhões de ha e 24,8 milhões de ha, respectivamente (MapBiomas, 2025), e tais classes sofrem influência direta do manejo, das forrageiras e do estado de degradação. As áreas com pastagens degradadas na Amazônia são uma oportunidade para ampliação dos sistemas de ILP como alternativa para recuperação (Oliveira, 2015; Bortolon et al., 2019).

Em regiões da Amazônia onde há infraestrutura para aquisição de insumos, beneficiamento e comercialização da produção, o processo de adoção da ILP é mais acentuado, pois os custos de produção são menores e a rentabilidade maior. Notadamente onde a expansão da fronteira agrícola ocorre, sistemas integrados intensivos também se expressam mais.

Com influência das configurações de ILP adotados no Bioma Cerrado, são replicados na Amazônia, geralmente, o cultivo de soja na safra de verão e em sucessão o consórcio de milho+braquiária e, na sequência, "boi safrinha". A biomassa da forrageira pode ser utilizada como feno ou para pastejo, e após esta etapa o pasto em geral é dessecado e forma a cobertura para o próximo cultivo em SPD.

A falta de informações sobre o sistema de ILPF e seus benefícios aparece como razão preponderante para a baixa adoção na Região Norte, associados à falta de maquinário e mão de obra (Skorupa; Manzatto, 2019). Esse fato reforça a necessidade do investimento em estratégias regionais de transferência de tecnologias.

Assim, o componente florestal permanece como um desafio na adoção de sistemas de integração na Amazônia e faz com que as áreas de sistemas silvipastoris (IPF) e agrossilvipastoris (ILPF) sejam menores. Embora sejam reconhecidos os benefícios das árvores, a complexidade dos sistemas aumenta sob os aspectos técnicos e de gestão, desde a implantação até o manejo e comercialização.

Nesse contexto, destaca-se uma forma de implantação de sistemas silvipastoris ou de IPF, a arborização de pastagens, em que um guia de identificação e seleção de espécies arbóreas nativas foi disponibilizado por Andrade et al. (2012). De acordo com Martinez et al. (2019), existem diversas iniciativas com algumas espécies nativas em sistemas silvipastoris de IPF na região, por exemplo, com: mogno (*Swietenia macrophylla*) no Amazonas; mulateiro (*Calycophyllum spruceanum*) e bordão-de-velho (*Samanea tubulosa*) no Acre; cedro-doce (*Bombacopsis quinata*) em Roraima; taxi-branco (*Tachigali vulgaris*) no Amapá e paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*), cumaru (*Dipteryxodorata* sp.), castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*), taxi-branco e andiroba (*Carapa guianensis*) no Pará; além das espécies nativas, o uso de espécies exóticas como gliricídia (*Gliricidia sepium*), teca (*Tectona grandis*), mogno-africano (*Khaya ivorensis*) e eucalipto (*Eucalyptus* sp.).

Mesmo com algumas iniciativas envolvendo espécies arbóreas da Região Norte, a maioria dos sistemas de ILPF em maior escala envolve o eucalipto. Behling et al. (2021) destacaram o papel do eucalipto em sistemas integrados na Amazônia, ao apresentar dados de uma URT. No município de Plácido de Castro-AC, foram implantadas as espécies arbóreas *Eucalyptus pellita*, *E. urophylla* e as nativas paricá (*Schizolobium amazonicum*) e mulateiro (*Calicophyllum spruceanum*). Os eucaliptos produziram 36 m^3/ha de madeira, indicados para produção de estacas e mourões para cerca. Os autores também relataram sistemas silvipastoris em Macapá-AP, com cultivos iniciais de milho ou sorgo, nas entrelinhas do híbrido "Urograndis" (*E. urophylla* x *E. grandis*); na Fazenda Gamada em Nova Canaã do Norte-MT, o clone H13 do híbrido "Urograndis" em diferentes arranjos, com a madeira de eucalipto destinada a mourões de cerca, cultivo inicial de arroz, depois soja e, no 3º ano, formação de pasto de *B. brizantha* cv. Piatã e *B. ruziziensis*; em Brasnorte-MT, os arranjos envolveram o clone híbrido H13 "Urograndis", *E. cloeziana* e *Corymbia citriodora*; e, em um sistema de IPF na Fazenda Diana, em Paragominas-PA, foi produzido milho para silagem no primeiro ano e capim-mombaça para criação de bovinos.

Por fim, Martinez et al. (2019) destacam fatores determinantes para a adoção de sistemas de ILPF na Amazônia: condições socioeconômicas e perfil do produtor rural; infraestrutura disponível na propriedade e no município; condições edafoclimáticas; e viabilidade econômica dos modelos. Oliveira (2015) enfatizou alguns fatores essenciais para acelerar o processo de transição dos sistemas tradicionais para sistemas integrados de produção na Amazônia Legal: além do investimento em inovações tecnológicas, o conhecimento e monitoramento da diversidade de solos, clima e dos perfis de produtores e demandas da sociedade; políticas de regularização fundiária; melhoria da infraestrutura de transporte e energia, de subsídio para a aquisição de máquinas, implementos agrícolas e insumos agropecuários; e o apoio crescente à assistência técnica qualificada.

1.6.2 Bioma Mata Atlântica

As principais modalidades de integração praticadas na Mata Atlântica são ILP e ILF (Leite et al., 2017), apesar do crescimento da adoção de sistemas ILPF no Paraná, São Paulo e Minas Gerais. A Mata Atlântica é um bioma extremamente fragmentado, resultado de um longo histórico de desmatamento, e os sistemas de ILPF são essenciais para atenuar esse problema. Diferentemente da adoção em larga escala em biomas como o Cerrado, na Mata Atlântica a ILPF é uma estratégia crucial para a agricultura familiar e comunidades tradicionais.

Nas áreas de Mata Atlântica da Região Sul, encontram-se extensas áreas cultivadas em rotação, que se caracteriza como um dos mais antigos sistemas de ILP. No verão, as principais culturas são soja e milho; no inverno, forrageiras e culturas de cobertura, que servem tanto para a formação de palhada para SPD quanto para a alimentação animal (Balbino et al., 2011b).

A adoção da ILPF em São Paulo apresenta um cenário particular, por se tratar de um Estado com grande relevância econômica, alta concentração populacional e a melhor logística do país. A proximidade de grandes centros urbanos impulsiona a viabilidade econômica do sistema, especialmente para a agricultura familiar e para a comercialização de produtos com maior valor agregado.

Vinholis et al. (2020) avaliaram a adoção de sistemas de ILPF em São Paulo, concluindo que os adotantes de sistemas ILP possuem maior experiência com atividades agrícolas, participação mais frequente em cooperativas agrícolas, palestras e dias de campo, bem como recebem mais orientação técnica. O acesso ao crédito rural e o uso mais frequente de mecanismos para gestão do risco climático e econômico estão asso-

ciados ao componente agrícola do ILP. O fator escala de produção explica propriedades rurais mais extensas e estrutura mais robusta de máquinas agrícolas. A adoção dos sistemas IPF encontra-se em fase experimental nas propriedades rurais. Esses adotantes contam com outra fonte de renda, o que os confere maior flexibilidade para testar o sistema, em sua maioria, implantado de forma escalonada na área de pastagem e com recursos próprios. Predominam propriedades rurais menores, com relevo mais ondulado, solos arenosos, rebanhos menores e concentrados nas fases de cria/recria, além de maior diversificação da produção.

Por exemplo, na Fazenda Campina, em Caiuá-SP, adotou-se o sistema de ILP em 2013, constituído de dois anos com agricultura (soja na safra e milho+capim na safrinha, com pastejo no inverno) seguido de dois ou três anos com pecuária. Com a adoção desse sistema, observaram-se redução da área de pastagens, aumento da lotação animal e melhorias no desempenho animal. Em 2012/2013, a área destinada à atividade pecuária era de 1748 ha, com uma lotação animal média anual de 1,3 UA/ha. No primeiro ano de adoção da ILP, houve uma redução de 21,33% na área de pastagem, e a lotação animal cresceu 23%, passando para 1,6 UA/ha, devido à melhoria na oferta quantitativa e na qualidade das pastagens formadas no primeiro ano de ILP. Comparando o primeiro ano de adoção com a safra 2016/2017, a área de pastagem foi reduzida em 52,23% e a lotação animal cresceu 54,61%, passando a 2,01 UA/ha. Na safra subsequente, ocorreu aumento da lotação, chegando a 2,25 UA/ha com redução da área de pastagem. Com adoção da ILP, observou-se o aumento médio do peso na desmama dos bovinos machos. No caso das fêmeas, bezerras pós-desmama mais bem nutridas em pastos de inverno na ILP conseguiram atingir peso de até 300 kg/cabeça, o que possibilitou submetê-las à estação de monta e inseminação com idades entre 10 e 14 meses com precocidade sexual significativa para a primeira cria, ou seja, obtiveram-se novilhas "superprecoces". Após cinco anos de adoção da ILP, o ganho de peso vivo diário (média anual) passou de 185 g/animal/dia para 469 g/animal/dia; a produtividade animal passou de 2,4 @/ ha para 16 @/ha; e a taxa de desfrute saiu de 40% para 43,54% (Cordeiro et al., 2020).

Outro destaque é o Sítio Nelson Guerreiro, adotante desde 2009, cuja proprietária é a Maria Fernanda Guerreiro, que mantém uma URT com sistemas de ILPF em parceria com a Embrapa Pecuária Sudeste e Embrapa Meio Ambiente (Rodrigues et al., 2017). O Sítio Nelson Guerreiro, uma propriedade agroecológica e orgânica localizada no município de Brotas-SP, representa um exemplo prático e bem-sucedido de como a colaboração com a pesquisa e a extensão rural pode traduzir o conhecimento científico em resultados tangíveis no campo (Guerreiro et al., 2016).

Diversos estudos (Fontaneli; Santos, 2003; Bortolini et al., 2005; Bartmeyer, 2006; Gonçalves; Franchini, 2007; Fontaneli et al., 2009) indicam o uso de sistemas de ILP para a região centrosul do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul com aveiapreta e azevém, em cultivo solteiro ou consorciado com ervilhaca ou trevos, para produção de forragem após as culturas de verão; ou, então, o cultivo de culturas de inverno de duplo propósito (trigo, aveiabranca, triticale, centeio e cevada), para produção de forragem no outonoinverno e produção de grãos no final do inverno e no início da primavera.

No Paraná, pesquisas realizadas em parceria entre cooperativas, universidades, institutos e fundações de pesquisa, conduzidas desde 1995, permitiram definir um sistema de ILP usado na fase de terminação de animais. A adoção dessa tecnologia permitiu a formação de pequenas cooperativas envolvidas na cadeia da carne bovina, em caráter regional. A ILP com produção de leite também foi avaliada nesse estado, e os resultados dessa pesquisa foram disponibilizados em publicação de fácil acesso aos produtores envolvidos na cadeia do leite (Moraes et al., 2008).

Porfírio-da-Silva (2015) relatou diversas experiências com sistemas silvipastoris ou IPF no Paraná, Estado com áreas implantadas desde os anos 1970. Outras experiências foram relatadas por Ribaski et al. (2019) no noroeste do Paraná com sistemas silvipastoris ou IPF utilizando o eucalipto (*Corymbia citriodora*) com mandioca (*Manihot sculenta*) para produção de farinha e fécula. Após a colheita da mandioca aos 10 meses, a pastagem de braquiária (*B. brizantha*) foi implantada entre os renques arbóreos para pecuária de corte. Também apresentam um sistema de IPF com grevílea (*Grevillea robusta*) com braquiária (*B. brizantha*) para criação de gado de leite

1.6.3 Bioma Pampa

A ILP no Rio Grande do Sul tem um histórico que remonta ao início do século XX, quando a utilização da

resteva do arroz irrigado para alimentação do rebanho bovino foi aprimorada pela seleção de espécies forrageiras de estação fria, adaptada às condições de terras baixas (Reis, 1998), o que permite melhor aproveitamento da área e melhor distribuição da produção de forragem ao longo do ano (Balbino et al., 2011b).

Ao longo do tempo, novos modelos foram desenvolvidos, especialmente a partir da década de 1970, com destaque para a integração de culturas de soja e milho com pastagens de inverno de aveia, azevém, trigo duplo propósito e cevada forrageira. Essa forma de ILP tem se mostrado uma estratégia eficiente para aumentar a produtividade e a sustentabilidade da produção rural no Rio Grande do Sul.

A geração de conhecimentos e tecnologias para o desenvolvimento de sistemas integrados de produção no bioma Pampa tem sido uma ação conjunta entre as instituições de ensino, pesquisa e extensão. Os trabalhos realizados estão orientados para: i) desenvolvimento de sistemas de ILP nas áreas de várzeas de cultivo de arroz; ii) recuperação de campos degradados pelo excesso de carga animal; iii) desenvolvimento de tecnologias de controle do capim Annoni; iv) diversificação da matriz produtiva nas áreas de criação extensiva de gado, introduzindo culturas anuais; v) disponibilização de espécies forrageiras de crescimento hibernal, adaptadas às condições de terras baixas e dos campos; vi) desenvolvimento de tecnologias de manejo de forragem dos campos nativos; e vii) seleção de trigo de duplo propósito e a introdução de culturas anuais de inverno nas áreas em que predomina a sucessão trigo-soja (Balbino et al., 2011b).

Algumas justificativas científicas da adoção da ILP no Bioma Pampa podem ser resumidas por: manutenção da biodiversidade e sustentabilidade agropecuária; recuperação da qualidade do solo e conservação de suas características produtivas (aumenta agregação do solo, fitomassa radicular após pastejo e diversidade microbiana); otimização e intensificação da ciclagem de nutrientes no solo (aumenta o efeito da ciclagem da calagem em profundidade e a ciclagem de K); maior eficiência na utilização de recursos (água, luz, nutrientes e capital) e ampliação do balanço energético; aumento da produção de grãos, carne, leite, produtos madeireiros e não madeireiros em uma mesma área; maior otimização de processos e fatores de produção; geração de empregos diretos e indiretos; redução da sazonalidade do uso de mão de obra no campo e do êxodo rural; possibilidade de aplicação em propriedades rurais de todos os tamanhos e perfis; redução da pressão pela abertura de novas áreas com vegetação nativa; melhoria do bem-estar animal em decorrência do maior conforto térmico nos sistemas integrados com árvores; mitigação das emissões de GEE; melhoria da imagem pública dos agricultores perante a sociedade; aumento da renda líquida, permitindo maior capitalização de produtor; melhora da estabilidade econômica com redução de riscos e incertezas, devido à diversidade da produção (Carvalho et al., 2007; Martins et al., 2015; Gotuzzo, 2025).

Alguns benefícios da adoção da ILP bem manejada na pecuária de cria nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina: recuperação de pastagens e do solo: permite renovação de pastagens degradadas, melhorando a nutrição das matrizes e o ganho de peso dos terneiros; maior capacidade de suporte: maior número de vacas sem ampliar a área da propriedade rural; maior taxa de prenhez e desmame: com melhor alimentação e nutrição, as vacas voltam a ciclar em menor período após o parto, aumentando a taxa de terneiros desmamados; melhor escore de condição corporal ideal, entre 3,0 e 3,5, é mantido com pastagens e suplementação adequadas, melhorando a fertilidade das vacas e o crescimento dos terneiros; melhoria da gestão de propriedade: a diversificação de atividades exige maior planejamento e permite uma ocupação mais racional da área, com melhor aproveitamento dos pastos, adubação com objetivos bem definidos e melhores controles zootécnicos; redução de idade de primeiro parto e maior peso à desmama: com nutrição adequada desde cedo, terneiras antecipam sua entrada na fase reprodutiva e terneiros desmamam mais pesados, agregando valor ao sistema; e estratégia para contornar a variação de terneiros e novilhos para terminação de pastagens anuais de inverno (Saibro; Silva, 1999; Carvalho et al., 2007; Saibro et al., 2009; Martins et al., 2015; Silva et al., 2011; Fontaneli et al., 2012; Gotuzzo, 2025).

1.6.4 Bioma Caatinga

A pecuária, há mais de 300 anos, foi uma das primeiras atividades de ocupação no bioma Caatinga, seguida pela agricultura de subsistência. As práticas adotadas eram, na maioria das vezes, extrativistas. Na primeira, predominou o superpastoreio e, na segunda, desmatamento e queimadas. Os impactos negativos

sobre os ecossistemas de produção resultaram em elevados níveis de degradação dos recursos naturais (Araújo Filho, 2002).

Os solos predominantes no bioma Caatinga são rasos, com baixa capacidade de armazenamento de água, além de ocorrer elevada perda por evapotranspiração. O uso de insumos pelos agricultores é raro, o que faz com que os nutrientes retirados pelas plantas não sejam repostos. Os processos de degradação se mostram mais acentuados nas unidades da agricultura familiar, em virtude de sua menor área e da maior intensidade de uso. A semiaridez traz uma série de impactos para a agricultura: a produção de biomassa é baixa, a vegetação é mais esparsa, expondo mais o solo às intempéries e perdas por erosão e há baixa concentração de MOS, devido à pouca cobertura do solo, erosão laminar, além da perda natural por oxidação.

O cenário de degradação de pastagens cultivadas no semiárido é preocupante e estimula o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para a produção de ruminantes em pastejo nessa região, na qual a pecuária e a agricultura, exploradas isoladamente, dificilmente apresentam relação custo-benefício satisfatória. Práticas que objetivam menor degradação do solo e maior sustentabilidade têm recebido atenção crescente. Os sistemas de ILPF podem reduzir a vulnerabilidade da produção animal em áreas semiáridas quando promovem a recuperação de pastagens em degradação e possibilitam a diminuição das perdas de recursos como solo e água.

Pastagens cultivadas com gramíneas adaptadas ao semiárido podem garantir solos com maior teor de MOS e melhores características físicas, pois essas espécies protegem o solo, melhoram sua estrutura e aumentam a ciclagem de nutrientes, conferindo mais saúde ao solo do que práticas de manejo inadequadas. É fundamental escolher forrageiras que se adaptem às condições específicas de clima e solo do semiárido, garantindo sua sobrevivência e benefícios ao solo. Assim, no semiárido, onde a irregularidade das chuvas e o déficit hídrico são os principais limitantes, o consórcio de gramíneas tolerantes à seca (sorgo, milheto) com leguminosas (como feijão-guandu, leucena, gliricídia, estilosantes, etc.) vem melhorando a produtividade agropecuária.

O Sistema CBL de Produção é considerado como um modelo de ILPF para o Semiárido brasileiro, pois possui o componente pecuário associado à produção agrícola e/ou florestal (Guimarães Filho et al., 1995; Guimarães Filho; Soares, 1999). Segundo os autores, esse sistema é baseado na combinação de Caatinga (C), Capim-Buffel (B) e Leucena (L) para a produção animal sustentável e, portanto, com a divisão da área da propriedade em três usos: i) pastagem cultivada com Capim-Buffel, gramínea adaptada às condições do semiárido; ii) Caatinga pastejada, constituída de vegetação nativa, rica em plantas forrageiras, dividida em piquetes de aproximadamente 30 ha cada, que são utilizadas para pastejo rotacionado; e iii) área de cultivo de leguminosas para fornecimento de alimentação ao rebanho.

O Sistema CBL preconiza a utilização da Caatinga como fonte de pasto nativo e a utilização de espécies resistentes e adaptadas às condições climáticas da região semiárida do Nordeste na forma de pastagem cultivada e utilização como forragem conservada (Moraes et al., 2021). A manutenção de pastagens nativas e a adoção de sistemas de ILPF podem ser a chave para a adaptação de mitigação de GEE nas áreas de semiárido. Mendes et al. (2025) afirmam que Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTDS) podem atuar como consideráveis sumidouros de carbono com implicações para os climas locais, regionais e globais.

O Sistema ILPF Caatinga é uma versão adaptada e otimizada de um sistema de ILPF, considerando as condições de solo, clima e realidade dos pequenos e médios produtores do semiárido. Esse sistema visa à diversificação produtiva, segurança alimentar dos rebanhos e conservação do bioma Caatinga. Este sistema deriva do "SAF Sobral", um sistema agroflorestal que consistia no raleamento da Caatinga em savana, a fim de aumentar a produção de alimento na pastagem nativa de forma sustentável (Araújo Filho et al., 2010). O sistema ILPF Caatinga consiste em um modelo com faixas de vegetação nativa intercaladas com faixas desmatadas destinadas ao cultivo de grãos e de espécies forrageiras. Esses cultivos consistem de espécies forrageiras como sorgo, milheto, feijão-guandu, além do capim Massai e pastagem nativa. A produção propicia produção de silagem e autonomia alimentar de pequenos ruminantes nas épocas secas.

Por sua vez, o Sistema Glória de Produção de Leite foi desenvolvido para as bacias leiteiras das zonas agrestes de Pernambuco, Alagoas e Sergipe, um sistema que tem baixo nível de uso de insumos e baixo impacto

ambiental. É fundamentado na mão de obra familiar e tração animal, na infraestrutura agrossilvopastoril adaptada à seca, em animais zootecnicamente compatíveis com o ambiente, na prática de conservação de forragem associada com enriquecimento de restos de culturas, em cultivos consorciados e na reciclagem de resíduos vegetais e animais. O sistema abrange pastagens cultivadas com capins Buffel, *Urochloa*, Pangolão e grama Aridus; palma forrageira consorciada com leucena ou gliricídia e milho/sorgo; leucena cultivada em alameda com milho/sorgo; cercas vivas forrageiras de gliricídia e áreas reflorestadas com gliricídia e sabiá (Sá; Sá, 2006).

No Agreste Paraibano, o sistema ILP empregando o SPD são ótimas alternativas para o cultivo de grãos e forragens. A estratégia ajuda na retenção de umidade no solo, aumenta o teor de matéria orgânica e protege o solo contra a erosão. O cultivo de milho e *B. brizantha* cv Piatã, apresenta ótimos resultados por elevada tolerância à seca, produção de biomassa e competição reduzida do capim com o milho (Zonta et al., 2016).

Em referência aos princípios de uma agricultura de baixo carbono, os benefícios das estratégias ILPF para os sistemas produtivos no Bioma Caatinga vão além do aumento de eficiência de produção. A diminuição dos GEE proporcionada pelas boas práticas advindas dos modelos integrados de produção justifica a adoção desses modelos, configurando-os como estratégias tanto de mitigação quanto de adaptação às mudanças climáticas. Espécies de gramíneas mais resistentes aos baixos índices de precipitação como o milheto (*Pennisetum glaucum*) e o sorgo (*Sorghum bicolor*) têm sido recomendados em cultivos consorciados com leguminosas como o guandu (*Cajanus cajan*), resultando em melhores aportes de nutrientes e menores perdas advindas dos riscos climáticos (Reis, 2023; Oliveira, 2024).

1.6.5 Bioma Cerrado

As fazendas que adotam a rotação lavourapasto na ILP como estratégia de produção agrícola na região do Cerrado podem se beneficiar da melhor estabilidade de produção de forragem para alimentar o rebanho durante o ano todo. No período das chuvas, as pastagens são mais produtivas, em virtude da melhoria da fertilidade do solo pelas lavouras. No período da seca, além da palhada e dos subprodutos de colheita, os pastos recémestabelecidos permanecem verdes e com qualidade e quantidade para conferir ganhos de peso positivos ao invés de perda de peso, comum nesse período do ano, na maioria das fazendas do Cerrado (Vilela et al., 2011).

No bioma Cerrado, vários sistemas de ILP são caracterizados de acordo com o perfil e os objetivos da fazenda. As diferenças nos sistemas podem ser atribuídas às peculiaridades regionais e da propriedade, como condições de clima e de solo, infraestrutura, experiência do produtor rural e tecnologia disponível. Contudo, três modalidades de integração se destacam: i) fazendas de pecuária, em que culturas de grãos, geralmente arroz, soja, milho e/ou sorgo, são introduzidas ou consorciadas em áreas de pastagens para recuperar a produtividade dos pastos; ii) fazendas especializadas em lavouras de grãos, que utilizam gramíneas forrageiras para melhorar a cobertura de solo em SPD e para uso da forragem na alimentação de bovinos na entressafra seca; e iii) fazendas que, sistematicamente, adotam a rotação de pasto e lavoura para intensificar o uso da terra e se beneficiar do sinergismo entre as duas atividades. Esses sistemas podem ser praticados por parcerias entre agricultores e pecuaristas (Vilela et al., 2011).

Na Fazenda Barreirão, em Professor Jamil-GO, foram recuperados, pelo Sistema Barreirão, cerca de 1.100 ha de pastagem, principalmente com a cultura do arroz, cuja produtividade média foi de 33 sacos/ha, durante seis anos consecutivos (1986 a 1991). A produtividade média do milho foi de, aproximadamente, 3.900 kg/ha. Esses rendimentos possibilitaram cobrir, em média, cerca de 80% dos gastos com custeio. A área recuperada resultou em dobrar a capacidade de suporte e a manutenção/ganho de peso na entressafra, graças à continuidade de produção forrageira, principalmente da *B. brizantha* e *Andropogon gayanus*, no período seco (Kluthcouski et al., 2003).

Em trabalho realizado em Brasilândia-MS por Barcellos et al. (1999), comparou-se à renovação indireta de pastagens com as culturas de milho (RM) e arroz (RA) no Sistema Barreirão de ILP, com a renovação direta sem agricultura (RD). No ano agrícola de 1994/1995, a espécie *B. humidicola* foi substituída por *B. brizantha* cv. Marandu. Os resultados indicam que as estratégias de renovação foram eficientes para restabelecer a capacidade produtiva das pastagens, e durante o período de chuvas, a lotação animal na RM foi de 3,04 UA/ha, decrescendo para 2,79 UA/ha e

2,65 UA/ha em RA e RD, respectivamente. Nos tratamentos com manejo da fazenda e testemunha (TT), as taxas de lotação foram de 1,20 e 1,51 UA/ha, respectivamente. Os ganhos de peso diários foram semelhantes (entre 434 e 467 g/animal/dia), mas os ganhos de peso vivo por área foram diferentes entre os tratamentos, atingindo 670, 593, 596 e 366 kg PV/ha/ano na RM, RA, RD e TT. Além de melhores resultados, a produção de grãos alcançada em RM e RA amortizou, respectivamente, 46% e 80% dos custos de renovação das pastagens. A incorporação de fertilizantes, revolvimento do solo, aumentando a disponibilidade de nitrogênio, e a substituição de *B. humidicola* por *B. brizantha* cv. Marandu são apontados como responsáveis pelo comportamento da pastagem. A menor taxa de lotação em RA e RD em relação à RM pode ser atribuída à menor aplicação de fertilizantes, principalmente fósforo e nitrogênio.

Resultados com a adoção do consórcio de culturas anuais com forrageiras no Sistema Santa Fé foram obtidos em propriedades rurais, como a Fazenda Santa Fé e Fazenda Santa Lúcia, em Santa Helena de Goiás-GO. O objetivo era produção de ensilagem de capim, notadamente de *B. brizantha*, ou corte e distribuição no cocho de animais em confinamento (produção de 30 t de matéria verde/ha a cada 45 dias), bem como para produção forrageira para pastejo direto na recria de bovinos. No primeiro ano de pastejo, na época seca, a lotação animal foi, em média, de 3,0 UA/ha, com ganho de peso entre 250-300 g/animal/dia, apenas com fornecimento de sal comum. Nas águas, a capacidade de suporte chegou a 12 animais/ha (com até 7,0 UA/ha) de bovinos para recria (Kluthcouski et al., 2003). Magnabosco et al. (2003) relatam efeitos benéficos da adoção da ILP por meio do Sistema Barreirão, em Santo Antônio de Goiás-GO, com resultados médios referentes à taxa de lotação na seca e nas águas de 1,48 e 2,68 UA/ha, respectivamente. O ganho de peso acumulado médio foi de 470 kg/ha/ano, ou seja, 31,33 @/ha/ano. O mesmo autor também relata resultados obtidos na mesma região com a ILP pelo Sistema Santa Fé, e os pesos médios de entrada e saída dos animais nas áreas foram de 350 e 473 kg/animal, respectivamente, o que gerou um ganho de 123 kg PV/animal, atingindo ganho de peso vivo diário médio de 1,293 kg/animal. Esses resultados mostraram que o Sistema Santa Fé de ILP viabilizou a terminação de animais em pastagens disponibilizadas para o período de entressafra, possibilitando um ganho acumulado por área de 332 kg PV/ha, e peso vivo médio de 381 kg/animal aos 19,4 meses de idade, apenas com suplementação mineral. O ganho de peso diário chegou a 0,730 kg, gerando um ganho acumulado de 652 kg PV/ha.

Vilela et al. (2008) reportaram desempenho animal em duas pastagens, uma degradada de *B. brizantha* cv. Marandu, e uma outra formada após o cultivo da soja em ILP, em Planaltina-DF. Observou-se que, no período das chuvas, o ganho de peso vivo de bovinos em recria foi de 683 kg/ha (ou 45,53 @/ha), na pastagem formada em ILP versus 269 kg/ha (ou 17,93 @/ha) na pastagem comum degradada.

Em termos de ganho na produtividade animal devido à adoção de sistemas de ILP no bioma Cerrado, Vilela e Martha Júnior (2010) citam alguns exemplos de impactos positivos: a) incrementos médios de produtividade animal na recria-engorda de cerca de quatro vezes (600 kg de peso vivo/ha/ano) em relação à recria-engorda na pecuária tradicional (120-150 kg de peso vivo/ha/ano); e b) incrementos médios de produtividade animal na cria de cerca de três vezes (300 kg de bezerros desmamados/ha/ano em relação à cria na pecuária tradicional (85-110 kg de bezerros desmamados/ha/ano).

Kichel et al. (2014) relatam resultados com sistemas de ILP obtidos em Campo Grande-MS, onde a produtividade da cultura da soja, milho safrinha e carne, no período de outubro de 2006 a setembro de 2010, foram de: 58 sacas/ha/ano; 37,7 sacas/ha/ano; e, 31,4 @/ha/ano, respectivamente. A pastagem foi utilizada para recria e engorda de bovinos, que entraram no experimento com peso vivo de 170 a 200 kg e, após um ano de pastejo, saíram da área com 370 a 400 kg de peso vivo médio, com ganho médio diário de 548 g/animal. A lotação média obtida nos quatro anos foi de 4,71 animais de recria e engorda por hectare por ano ou 3,3 UA/ha/ano, e a lotação máxima foi obtida no último ano com 5,7 animais/ha ou 4 UA/ha/ano. Nos sistemas de ILP, a produtividade aumentou em 7,85 vezes ou 685%, e a lucratividade em 18,3 vezes ou 1.730%, com redução no uso de pesticidas. Além da alta produtividade e qualidade da carne, o sistema permite reduzir a emissão de GEE por kg de carne, aumentando os níveis de MOS, mostrando ser um sistema altamente sustentável.

Salton et al. (2015b) também observaram aumento da produtividade das pastagens em experimentos de

longa duração com ILP no Mato Grosso do Sul, por exemplo: maior lotação animal, maior produtividade de carne por área e melhor qualidade da pastagem durante a estação chuvosa; e durante a seca, maior oferta de pastagem aos animais, sendo ambas as situações favorecidas pela adubação da lavoura antecessora.

Outro exemplo desse tipo de trabalho em parceria foi realizado na Fazenda Santa Terezinha, em Uberlândia-MG, a qual desenvolvia atividade de cria e tinha uma área, em 1983, de 1.014 hectares de pastagens degradadas e um rebanho de 1.094 cabeças, ou seja, com uma taxa de lotação de 1,1 cabeça/ha. O principal sistema de ILP adotado consistia no cultivo de soja por dois anos, e no terceiro se introduzia a pastagem em plantio simultâneo com milho. Assim, a partir de 1985, a propriedade passou a destinar áreas de pastagens para a produção de soja em ILP até atingir, em 1996, a totalidade da área com um ou mais ciclos de lavoura. Em 1996, a área destinada a pastagens representava apenas 36% da área total da fazenda; o rebanho era de 1.200 cabeças, representando uma taxa lotação três vezes superior à inicial, em torno de 3,2 cabeças/ha (Ayarza et al., 1993, 1999; Vilela et al., 1999).

De igual forma, na Fazenda Santa Brígida, em Ipameri-GO, observou-se que a taxa de lotação animal média anual era de 0,5 UA/ha em pastagens degradadas, passando a 1,0 UA/ha no primeiro ano de ILP, e passou a ser de 2,5 UA ha com animais em fase de engorda, durante 60 dias, no período de inverno, após a adoção de ILP com soja no verão seguida de milheto ou sorgo ou milho, consorciados com braquiária em safrinha. Ao longo dos anos, a lotação animal atingida com ILP foi de até 4,0 UA/ha, com animais em fase de recria, durante 120 dias também no período de inverno. Outro incremento importante foi na produtividade de carne, que passou de 69 kg/ha (2,3 @/ha) de peso vivo em 2006/2007 para 730 kg/ha (24,3 @/ha) de PV em 2015/2016, antes e após a adoção da ILP, respectivamente, tendo sido ofertado apenas sal proteinado aos animais em pastejo. Destaca-se, contudo, o teor de MOS na camada de 0 a 20 cm, que aumentou em torno 200%, passando de 1,8%, em 2006, para 3,5%, em 2016. Também ocorreu um incremento gradual da produtividade de grãos na ILP tanto para o milho quanto para a soja. Também se produz milho para silagem consorciado com braquiária em sucessão ao cultivo de soja precoce, cuja produtividade tem sido superior a 50 t/ha. O principal benefício é que, após a colheita da silagem, a área fica com pastagem de alta qualidade para alimentação animal durante a estação seca (Oliveira et al., 2013, 2015, 2019).

Foram observados diversos benefícios da adoção da ILP no Sistema Boi Safrinha na Fazenda Triunfo, em Formosa do Rio Preto-BA. Trata-se de propriedade rural de produção de grãos, onde se passou a ter elevado o potencial de produção de carne na entressafra seca em pastagens formadas na safrinha. Normalmente, as áreas de produção de soja na safra são sucedidas por milho consorciado com capim, e após a colheita do milho fica estabelecida a pastagem. O ganho de peso, em equivalente carcaça, de bovinos machos inteiros com predominância da raça Nelore foi de 50,6 kg/ha e 103,2 kg/ha em áreas de pastagem de *B. ruziziensis* e *B. brizantha* cv. Piatã, respectivamente, ao passo que 29%, 28% e 42% dos animais foram abatidos, respectivamente, aos 70, 112 e 134 dias de pastejo. No período total de período de 134 dias de pastejo, a lotação foi 0,73 UA/ha na área com *B. ruziziensis*, produzindo 800 g/animal/dia e uma produção de 3,4 @/ha. Na área com *B. brizantha* cv. Piatã, a lotação animal foi de 1,35 UA/ha, produzindo 980 g/animal/dia e uma produção de 6,9 @/ha (Vilela et al., 2017).

Em estudo conduzido com ILPF na pecuária leiteira, em Ponte Alta, Gama-DF, vacas Gir Leiteiro que tiveram acesso a áreas com sombra de eucalipto na ILPF produziram 22% a mais de leite ao longo do período do estudo (33 meses). No período seco do ano, o aumento foi de 17%. Além disso, produziram quatro vezes mais embriões durante o período mais quente do ano na ILPF do que no sistema a pleno sol. O leite produzido pelo rebanho sombreado da ILPF apresentou 6% a mais de extrato seco desengordurado, valorizado pelos laticínios. Em dias quentes, os animais têm estresse por calor, o que compromete a produção e a composição do leite, a reprodução, a temperatura superficial e o comportamento ingestivo (ingestão, ruminação e repouso). A presença das árvores chegou a reduzir em até 3% a temperatura corporal dos animais, o que comprova o bem-estar animal e conforto térmico na ILPF. A presença das árvores na ILPF melhora a rentabilidade do produtor de leite, tanto por causa do aumento da quantidade do produto, quanto pela possibilidade de melhor remuneração dos sólidos totais pelos laticínios e pela venda da madeira para diferentes usos (Ferreira et al., 2021).

1.7 ILPF EM POLÍTICAS PÚBLICAS

Balbino et al. (2011b) destacam que se faz necessária a criação de políticas públicas para que os agricultores consigam superar barreiras econômicas e barreiras operacionais na adoção de sistemas de ILPF. Além disso, é fundamental a realização de investimentos em capacitação de técnicos e na formação de profissionais de ensino superior e de escolas profissionalizantes.

Historicamente, diferentes políticas públicas promovem o fomento de sistemas agropecuários conservacionistas e sustentáveis no Brasil. Certamente, a principal delas é o Plano ABC, que colocou o setor agropecuário num outro patamar em termos do potencial de contribuição para a mitigação dos GEE causadores de mudanças do clima, para a promoção da adaptação dos processos produtivos e das comunidades rurais, com elevação da resiliência (Cordeiro; Ramos, 2020).

As diferentes modalidades de ILPF compuseram a primeira fase do "Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas Visando à Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC", instituído em 2009 para contribuir com os objetivos de mitigação da emissão de GEE, em que foi prevista a expansão desses sistemas em 4 milhões de hectares (Brasil, 2012).

Avaliando suas consequências para mitigação das emissões de GEE e utilizando-se do fator de mitigação de 3,79 Mg CO_2eq/ha/ano (Brasil, 2012), tem-se que o avanço de 10,76 milhões de hectares de ILPF contribuiu com o sequestro de 40,78 milhões Mg CO_2eq, cumprindo com 185% do compromisso de mitigação estabelecido como meta original (Costa et al., 2023).

Em 2021, o Plano ABC foi revisado e lançadas as bases conceituais da nova fase dessa política pública, chamado Plano ABC+, com vigência até 2030. O objetivo é avançar nas soluções tecnológicas sustentáveis para a produção no campo e a melhoria da renda do produtor rural, com foco no enfrentamento da agropecuária às mudanças do clima. Esse plano reestrutura os conceitos e estratégias, mantendo o compromisso com a sustentabilidade na produção de alimentos, fibras e energia, promovendo resiliência e aumentando a produtividade e renda dos sistemas agropecuários de produção, permitindo ainda redução de emissões de GEE. Dentre as estratégias, está a manutenção de sistemas de ILPF. O Plano ABC+ contará com estratégias de transferência, assistência técnica, capacitação (Brasil, 2021a).

Nessa segunda fase, o Plano ABC+ continuará a agir como um instrumento promotor de uma agropecuária sustentável, considerando uma abordagem integrada da paisagem, destacando seu enfoque em adaptação e contribuindo para a mitigação de GEE. Para tal, reforçam-se as estratégias de sucesso adotadas e consolidadas no primeiro ciclo (2010-2020), focadas no estímulo à adoção de Sistemas, Práticas, Produtos e Processos de Produção Sustentáveis (SPSABC), fundamentados sobre bases técnico-científicas. Por exemplo, manteve-se a estratégia ILPF (Sistemas de Integração – SIN) como uma das tecnologias protagonistas, tendo uma meta de aumento em 10 milhões de hectares na área de adoção (Brasil, 2021a, 2021b).

Em 29 de abril de 2013, foi sancionada a Lei Federal nº 12.805, que institui a "Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta" (e que altera a Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991). Os objetivos desta legislação incluem: melhorar de forma sustentável a produtividade, a qualidade dos produtos e a renda das atividades agropecuárias, por meio da aplicação de sistemas integrados de exploração de lavoura, pecuária e floresta em áreas já desmatadas, como alternativa aos monocultivos tradicionais; mitigar o desmatamento e contribuir para a manutenção das áreas de preservação permanente e reserva legal; e fomentar novos modelos de uso da terra, conjugando a sustentabilidade do agronegócio com a preservação ambiental (Brasil, 2013).

Cordeiro e Balbino (2019) destacam outras Políticas Públicas de Fomento à ILPF, como projetos com recursos internacionais, programas estaduais e ações em programas de governo. Além disso, os autores afirmam que o desafio atual é de ampliar ações compartilhadas com instituições públicas e privadas, bem como fortalecer a rede de diferentes atores envolvidos na difusão de sistemas de ILPF. Um exemplo citado é a "Rede de Fomento ILPF", uma parceria público-privada que busca fortalecer e oferecer suporte aos sistemas de integração, bem como acelerar o aumento da adoção desses sistemas de integração, pela união de esforços da Embrapa e de instituições e empresas parceiras (Cordeiro; Balbino, 2019). Atualmente, esta parceria público-privada é denominada como "Associação Rede ILPF".

Recentemente, o Governo Federal instituiu o "Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPD)", por meio do Decreto

nº 11.815/2023 (Brasil, 2023). A pretensão é a recuperação e conversão de até 40 milhões de hectares de pastagens de baixa produtividade em áreas agricultáveis em dez anos, podendo dobrar a área de produção de alimentos sem desmatamento, evitando assim a expansão sobre áreas de vegetação nativa. Neste decreto, definem-se sistemas de produção agropecuários e florestais sustentáveis como aqueles que, respeitadas as normas de uso da terra de cada território, podem incluir modelos produtivos que convertam pastagens degradadas em lavoura, unicamente com culturas temporárias ou em sistema integrado, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), a integração lavoura-pecuária (ILP) ou a integração lavoura-floresta (ILF), conforme as condições de solo e clima, o que pode ser feito em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação. Segundo Mapa (Brasil, 2025), atualmente, esse programa é denominado "Caminho Verde Brasil", que visa impulsionar a recuperação ambiental e a produtividade do setor agropecuário por meio da restauração de áreas degradadas e da promoção de práticas sustentáveis, como os sistemas de integração. Portanto, é grande a expectativa para expansão da adoção de estratégias de recuperação e renovação de pastagens degradadas, por meio de sistemas de ILP e ILPF, com reflexos positivos nos aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Estudo realizado por Bolfe et al. (2024) indica a existência de aproximadamente 28 milhões de hectares de pastagens plantadas no Brasil com níveis de degradação intermediário e severo que apresentam potencial para a implantação de culturas agrícolas, principalmente por meio da ILP. De acordo com os autores, se considerar somente o cultivo de grãos, esse montante representaria um aumento de cerca de 35% da área total plantada em relação à safra 2022/2023. A iniciativa representa um esforço para integração de diferentes bases de dados públicas e pode contribuir, com análises detalhadas e qualificadas, para orientar a tomada de decisão de setores das cadeias produtivas agrícolas e a elaboração de políticas para desenvolvimento sustentável, como o Plano ABC+ e o PNCPD, do Mapa. As pastagens brasileiras cobrem aproximadamente 177 milhões de hectares, dos quais aproximadamente 40% apresentam médio vigor vegetativo e sinais de degradação, enquanto 20% apresentam baixo vigor vegetativo, ou degradação severa. Foram mapeados aproximadamente 10,5 milhões de hectares de pastagens com condição severa de degradação e 17,5 milhões de hectares com condição intermediária que apresentam potencial bom ou muito bom para a conversão para agricultura. Entre os Estados que apresentaram as maiores áreas, dentro desses parâmetros, estão o Mato Grosso (5,1 milhões de ha), Goiás (4,7 milhões de ha), Mato Grosso do Sul (4,3 milhões de ha), Minas Gerais (4,0 milhões de ha) e o Pará (2,1 milhões de ha) (Embrapa, 2024).

1.8 FUTURO E DESAFIOS DA ILPF

O sistema de ILPF é dinâmico e complexo, em virtude das interações entre culturas, animais e diversas práticas. Por serem dinâmicos, esses sistemas necessitam de pesquisas científicas e tecnológicas contínuas, quase sempre realizadas por meio de experimentos de longa duração e regionalizados, sem os quais haveria comprometimento da sua sustentabilidade, o que dificultaria a sua adoção por produtores rurais. Muitas linhas de pesquisa transferência de tecnologia e fomento precisam ser fortalecidas, para que haja incremento no aporte de conhecimento e informações e na adoção da ILPF, enquanto proposta sustentável (Balbino et al., 2011a).

Balbino et al. (2011b) elencaram os principais desafios para a transferência de tecnologias de sistemas de ILPF: déficits de pessoal, treinamento, nivelamento, apoio interno e estrutura na Embrapa, devendo, portanto, haver o fortalecimento da transferência de tecnologia; baixa agilidade operacional e administrativa para a promoção de ações de transferência; necessidade de nivelamento do conhecimento entre os pesquisadores, bem como a formação de consultores; necessidade de estabelecer um marco referencial desde o nivelamento de conceitos até a conduta ética; necessidade de interação e capacitação interna para trabalhar com ILPF; necessidade de apoio externo a Organizações Estaduais de Pesquisa Agropecuária (OEPAs), Organizações Não Governamentais (ONGs) e empresas de extensão rural pública; ausência ou pouca expressão da extensão rural; necessidade de formação de multiplicadores e de adequação das instituições para operacionalizar a extensão rural; insuficiente integração institucional, com o envolvimento de agentes de instituições financiadoras, gestores públicos, ministérios, agentes de transferência de tecnologias pública e privada e outros; distância e dificuldade de

acesso entre os centros geradores de tecnologias e os usuários; custos locais elevados devido à distância e/ou ao isolamento; baixo número de URTs implantadas; maior complexidade dos sistemas integrados; necessidade de quebra de paradigmas por parte de produtores, extensionistas, pesquisadores, gestores públicos e agentes financiadores; carência de marketing do sistema ILPF vinculado ao marketing institucional; ausência de análises socioeconômicas que contemplem avaliações de curto e longo prazos de distintos sistemas de ILPF; ausência de políticas públicas direcionadas para a ILPF, sendo necessária a adequação da legislação para, por exemplo, facilitar o acesso ao crédito e à realização de seguro agrícola em sistema ILPF; falta de continuidade das ações de transferência de tecnologia; e necessidade de regularização fundiária em determinadas regiões brasileiras.

1.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é uma estratégia de produção consolidada, composta por diferentes modalidades e sistemas desenvolvidos com uma base científica robusta e um forte apoio político-institucional. A expansão da área de adoção, os ganhos de produtividade e os comprovados benefícios ambientais, como o sequestro de carbono, são indicativos de que a ILPF se tornou uma estratégia nacional para o desenvolvimento sustentável. A sinergia entre os componentes do sistema, demonstrada por ganhos de produtividade vegetal e animal em ambos os elos da cadeia, é a chave para a sua viabilidade econômica.

Apesar dos benefícios evidentes, a adoção da ILPF ainda enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de elevado investimento inicial, a dificuldade de acesso ao crédito, a falta de mão de obra capacitada para manejar a complexidade do sistema, e problemas estruturais de logística e mercado. Historicamente, a Embrapa atuou desenvolvendo sistemas, tecnologias e conhecimentos sobre os sistemas de ILPF. Entretanto, faz-se necessário um impulso maior na transferência de tecnologias referentes a esses sistemas, para que o maior número de produtores rurais possa se beneficiar de sua adoção.

O futuro da ILPF será impulsionado pela continuidade das ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), bem como em políticas públicas que alavanquem a sua adoção qualificada. A recuperação de áreas com pastagens degradadas continuará sendo importante fator de expansão do sistema, posicionando como uma solução crucial para o aumento da produção sem a necessidade de novas aberturas de áreas.

O estado da arte da ILPF reside na sua capacidade de alinhar a competitividade do agronegócio com a responsabilidade ambiental. Os diferentes sistemas de integração oferecem uma resposta tangível aos desafios do século XXI, como as mudanças climáticas e a segurança alimentar. A interconexão entre ciência, políticas de financiamento e a crescente adoção no campo, mesmo diante de desafios estruturais, demonstra a resiliência e a viabilidade do modelo. A ILPF, portanto, consolida-se como a manifestação de um novo paradigma de produção que é rentável, resiliente e fundamental para a liderança do Brasil no cenário agropecuário global.

1.10 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, R. C.; NOCE, M. A. **Integração lavourapecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 16p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 47).

ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; SANTANA, D. P.; SILVEIRA, M. C. T.; BORGHI, E. **Quinze anos de integração lavoura-pecuária e dez anos de integração lavoura-pecuária-floresta na Embrapa Milho e Sorgo**. Brasília: Embrapa, 2024. 343 p.

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A. **Carne Carbono Neutro**: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2015a. 32 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 210).

ALVES, F. V.; NICODEMO, M. L. F.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. Bem-estar animal em sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015b. p. 273-287. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; GOMES, R. C.; BUNGENSTAB, D. J. Marcas-conceito e a proposta de uma Plataforma de Pecuária de Baixo Carbono. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. p. 169-179.

ALMEIDA, R. G.; ALVES, F. V. (ed.). **Diretrizes técnicas para produção de carne com baixa emissão de carbono certificada em pastagens tropicais**: Carne Baixo Carbono (CBC). Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2020. 36 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 280).

ANDRADE, C. M. S.; SALMAN, A. K. D.; OLIVEIRA, T. K. (ed.). **Guia Arbopasto**: manual de identificação e seleção de espécies arbóreas para sistemas silvipastoris. Brasília: Embrapa, 2012. 345 p.

ARAÚJO FILHO, J. A.; CAMPANHA, M. M.; FRANÇA, F. M. C.; SILVA, N. L.; SOUSA NETO, J. M. Sistema de produção agrossilvipastoril no semiárido do Ceará. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: CLIMATE, SUSTAINABILITY AND DEVELOPMENT IN SEMI-ARID REGIONS – ICID+18, 2., 2010, Fortaleza, CE. **Anais** [...]. Fortaleza: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2010.

ARAÚJO FILHO, J. A. Histórico do uso dos solos da Caatinga. In: ARAÚJO, Q. R. (org.). **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus, BA: Editus, 2002. p. 329-337.

ASSAD, E. D.; CORDEIRO, L. A. M.; MARCHÃO, R. L.; ALMEIDA, R. G.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; BERNDT, A.; SALTON, J. C.; EVANGELISTA, B. A. Potencial de mitigação da emissão de gases de efeito estufa por meio da adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a EMBRAPA responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 289-305. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. p. 153-167.

AYARZA, M.; VILELA, L.; RAUSCHER, F. Rotação de culturas e pastagens em solo de Cerrado: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia, GO. **Anais** [...]. Goiânia, GO: SBCS, 1993. p. 121-122.

AYARZA, M.; VILELA, L.; PIZARRO, E. A.; DA COSTA, P. H. Agropastoral systems based on multiple-purpose legumes. In: GUIMARÃES, E. P., SANZ, J. I., RAO, I. M., AMÉZQUITA, M. C., AMÉZQUITA, E., THOMAS, R. (ed.) **Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America**. Cali: CIAT; Brasília: Embrapa, 1999. p. 175-193.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. i-xii, 2011a. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (ed.). **Marco Referencial**: integração lavoura-pecuáriafloresta. Brasília, DF: Embrapa, 2011b. 130 p.

BALBINO, L. C.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; KICHEL, A. N.; ROSINHA, R. O.; COSTA, J. A. A. **Manual orientador para implantação de unidades de referência tecnológica de integração lavoura-pecuária-floresta URT iLPF**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2011c. 48 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 303).

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. **Agricultura Sustentável por Meio da Integração Lavoura-PecuáriaFloresta (ILPF)**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2012. 18 p. (Informações Agronômicas, 138).

BAGGIO, A. J.; SCHREINER, H. G. Análise de um sistema silvipastoril com *Pinus elliottii* e gado de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 16, p. 19-29, 1988.

BAGGIO, A.J.; CARPANEZZI, O.B. Resultados preliminares de um estudo sobre arborização de pastagens com mudas de espera. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 18/19, p. 17-22, 1989.

BAGGIO, A. J.; PORFIRIO-DA-SILVA, V. Métodos de Implantação de Sistemas Silvipastoris na região do Arenito Caiuá, Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS: NO CONTEXTO DA QUALIDADE AMBIENTAL E COMPETITIVIDADE, 2., 1998, Belém, PA. **Resumo** [...]. Belém: Embrapa-CPATU, 1998. p. 189-191.

BARCELLOS, A. O.; VIANNA FILHO, A.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, I. P.; YOKOYAMA, L. P. **Restabelecimento da capacidade produtiva e desempenho animal em pastagens renovadas na região do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 4 p. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico, 22).

BARTMEYER, T. N. **Produtividade do trigo de duplo propósito submetido a pastejo de bovinos na região dos Campos Gerais – Paraná**. 2006. 82p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BEHLING, M.; MARTINEZ, G. B.; SILVA, A. R.; DE OLIVEIRA, T. K.; CIPRIANI, H. N. O eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na Amazônia. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JUNIOR, J. E. (ed.). **O eucalipto e a Embrapa**: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 1041-1053.

BERNARDI, A. C. C.; TADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; MARTIN NETO, L. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 569-600.

BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C.; SANO, E. E.; BAYMA, G.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; OLIVEIRA, A. F. Potential for agricultural expansion in degraded pasture lands in Brazil based on geospatial databases. **Land**, v. 13, n. 2, p. 200, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/land13020200.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 163-171, 2007. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200004.

BORTOLON, L.; BORGHI, E.; BORTOLON, E. S.; CAMARGO, F. P.; BENDAHAN, A. B. Integração lavoura-pecuária para recuperar pastagens na Amazônia. In: DIAS-FILHO, M. B.; ANDRADE, C. M.

S. (ed.). **Recuperação de pastagens degradadas na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 361-384.

BORTOLINI, P. C.; MORAES, A. de; CARVALHO, P. C. de F. Produção de forragem e de grãos de aveia-branca sob pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 6, p. 2192-2199, 2005. DOI: http://10.1590/S1516-35982005000700005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: ACS/MAPA, 2012. 172 p.

BRASIL. Lei n.º 12.805, de 29 de abril de 2013. Institui a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e altera a Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 150, n. 82, p. 1-2, 30 abr. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**: visão estratégica para um novo ciclo. Brasília: MAPA, 2021a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária 2020-2030**: plano operacional. Brasília: Mapa/DEPROS, 2021b. 133 p.

BRASIL. Decreto nº 11.815, de 5 de dezembro de 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis e o seu Comitê Gestor Interministerial. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 161, n. 231, p. 18, 6 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Caminho Verde Brasil**: restauração de terras e segurança alimentar. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/campanhas/caminho-verde. Acesso em: 2 set. 2025.

CARVALHO, P. C. F.; SILVA, J. L. S.; MORAES, A.; FONTANELI, R. S.; MACARI, S.; BREMM, C.; TRINDADE, J. K. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA, 2007, Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba: UFPR; Porto Alegre: UFRGS; Columbus: Ohio State University, 2007.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Integração Lavoura-Pecuária e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 15-43, 2015a.

CORDEIRO, L. A. M.; BALBINO, L. C.; GALERANI, P. R.; DOMIT, L. A.; SILVA, P. C.; KLUTHCOUSKI, J.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SKORUPA, L. A.; WRUCK, F. J. Transferência de tecnologias para adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa, 2015b. p. 377-393. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

CORDEIRO, L. A. M.; BALBINO, L. C. Políticas de fomento à adoção de Sistemas de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta no Brasil. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 99-115.

CORDEIRO, L. A. M.; KLUTHCOUSKI, J.; SILVA, J. R.; ROJAS, D. C.; OMOTE, H. S. G.; MORO, E.; SILVA, P. C. G.; TIRITAN, C. S.; LONGEN, A. **Integração Lavoura-Pecuária (ILP) em solos arenosos**: estudo de caso da Fazenda Campina no Oeste Paulista. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2020. 127 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 357).

CORDEIRO, L. A. M.; RAMOS, E. N. Sistemas agropecuários conservacionistas e sustentáveis. In: BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea dos fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020. p. 28-31.

COSTA, M. S. N.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D.; MANZATTO, C. V.; PEREIRA, S. E. M.; RAMOS, E. N.; ASSAD, E. D.; SKORUPA, L. A. Resultados em expansão de adoção das tecnologias ABC e mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) previstas no Plano ABC. In: BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo. **Plano ABC**: dez anos de sucesso e uma nova forma sustentável de produção agropecuária. Brasília: MAPA/SDI, 2023.

EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados. **Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1977-1978**. Brasília: Embrapa, 1979. 195 p.

EMBRAPA. **Adoção de ILPF chega a 11,5 milhões de hectares**. 2016. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17755008/adocao-de-ilpf-chega-a-115-milhoes-de-hectares. Acesso em: 3 nov. 2016.

EMBRAPA. **Com integração lavoura-pecuária, novo sistema intensifica a produção animal**. 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/78209704/com-integracao-lavoura-pecuaria-novo-sistema-intensifica-a-producao-animal#:~:text=O%20Sistema%20Pontal%20%C3%A9%20sustentado,nascimento%20de%20bezerros%20na%20seca. Acesso em: 7 fev. 2023.

EMBRAPA. **Brasil possui 28 milhões de hectares de pastagens degradadas com potencial para expansão agrícola**. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/87076753/brasil-possui-28-milhoes-de-hectares-de-pastagens-degradadas-com-potencial-para-expansao-agricola? p_ auth=SOzqBx7Y. Acesso em: 19 fev. 2024.

EMBRAPA. **Sistema Antecipasto**: consórcio soja com pasto. Disponível em: https://www.embrapa.br/agropecuaria-oeste/antecipasto. Acesso em: 7 ago. 2025.

EMBRAPA AGROSSILVIPASTORIL. **ILPF**: resultados de pesquisa na Embrapa Agrossilvipastoril. Sinop, MT: Embrapa Agrossilvipastoril, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1168623/ilpf-resultados-

de-pesquisa-na-embrapa-agrossilvipastoril. Acesso em: 20 dez. 2024.

EMBRAPA AGROSSILVIPASTORIL. **Sistema Bacaeri-Boi Teca**. Sinop, MT: Embrapa Agrossilvipastoril, 2025. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1175330/1/2025-cpamt-folder-mb-sistema-bacaeri-boiteca.pdf. Acesso em: 7 ago. 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 8 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 48).

FERREIRA, I. C.; FONSECA NETO, A. M.; MULLER, A. G.; MARTINS, C. F.; SILVA, F. A. M.; BRAGA, G. J.; MALAQUIAS, J. V.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; BALBINO, L. C.; GUIMARAES JUNIOR, R. **Produção de leite em sistema de Integração Lavoura-Pecuária- Floresta (ILPF) no bioma Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 26 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 375).

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S. **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 544 p.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos. Rendimento de grãos de trigo em sistemas de produção envolvendo pastagens anuais e perenes, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 9, p. 353-356, 2003.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H.P. dos; FONTANELI, R. S.; DEL DUCA, L. de J.; RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M.C.C.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do; MINELLA, E.; CAIERAO, E.; MORI, C. de; OLIVEIRA, J.T. de; MARIANI, F. Potencial de rendimento de cereais de inverno de duplo propósito. In: FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P. dos; FONTANELI, R.S. (Ed.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. p. 97-120.

GOTUZZO, C. C. Alavancando a pecuária de cria com integração lavoura-pecuária. In: FEDERACITE (ed.). **O agro com tecnologia**. Esteio: Federacite, 2025. p. 50-66

GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; CAMPANHA, M. M.; COSTA, T. C. C.; SIMÃO, E. P.; ALMEIDA, R. G.; ALVES, F. V.; PORFIRIO-DA-SILVA, V. **Mitigação de gases de efeito estufa em sistema de Integração Pecuária-Floresta e potencial de produção de Carne Carbono Neutro**: Fazenda Lagoa dos Currais, Curvelo-MG. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 17 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 230).

GUERREIRO, M. F.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, C. E. S.; BORGES, W. L. B. **Introdução de árvores em sistemas de produção agrícola no bioma Mata atlântica na região sudeste**. Brasília: Embrapa, 2016. 52 p.

GONÇALVES, S. A.; FRANCHINI, J. C. **Integração lavoura-pecuária**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 8 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 44).

GUIMARÃES FILHO, C.; SOARES, J. G. G.; RICHÉ, G. R. **Sistema Caatinga-Buffel-Leucena para produção de bovinos no semiárido**. Petrolina: Embrapa-CPATSA. 1995. 39 p. (Embrapa-CPATSA. Circular Técnica, 34).

GUIMARÃES FILHO, C.; SOARES, J. G. G. **Manejo dos rebanhos em anos de seca**: 9 medidas orientadoras. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 1999. 41 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 84).

KARAM, D.; BORGHI, E.; MAGALHAES, P. C.; PAES, M. C. D.; PEREIRA FILHO, I. A.; MANTOVANI, E. C.; DE SOUZA, T. C.; ADEGAS, F. S. **Antecipe**: cultivo intercalar antecipado. Brasília: Embrapa, 2020. 120 p.

KICHEL, A. N.; MIRANDA, C. H. B. **Sistema de integração agricultura & pecuária**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2001. (Embrapa Gado de Corte. Circular Técnica, 53).

KICHEL, A. N.; COSTA, J. A. A.; ALMEIDA, R. G.; PAULINO, V. T. Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF): experiências no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, v. 71, n. 1, p. 94-105, 2014.

KLUTHCOUSKI, J.; PACHECO, A. R.; TEIXEIRA, S. M.; DE OLIVEIRA, E. T. **Renovação de pastagem do cerrado com arroz**: I. Sistema Barreirão. Goiânia: Embrapa-CNPAF: 1991. 20 p. (Embrapa-CNPAF. Documentos, 33).

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L. P.; OLIVEIRA, I. P.; COSTA, J. L. S.; SILVA, J. G.; VILELA, L.; BARCELLOS, A. O.; MAGNABOSCO, C. U. **Sistema Santa Fé – Tecnologia Embrapa**: integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 38).

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Implantação, condução e resultados obtidos com o sistema Santa Fé. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 407-442.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Manejo Sustentável dos Solos dos Cerrados. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 59-104.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003a. 570 p.

KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P.; STONE, L. F. Fazendas de referência na Integração Lavoura-Pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.) **Integração Lavoura-Pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003b. p. 535-554.

KLUTHCOUSKI, J.; CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; BALBINO, L. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MÜLLER, M. Conceitos e modalidades da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 21-33. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

LEITE, B.; MASCARENHAS, G.; CRUZ FILHO, J. R.; BRITO, R. Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). Brasília: IABS, 2017. 68 p.

LESSA, L. S.; OLIVEIRA, T. K.; FURTADO, S. C.; LUZ, S. A.; SANTOS, F. C. B. Estabelecimento de espécies arbóreas nativas em unidades de observação de sistemas silvipastoris no Acre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 6., 2006, Campo de Goytacazes. **Bases científicas para o desenvolvimento sustentável**: resumos expandidos. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2006.

LUSTOSA, S. B. C. **Efeito do pastejo nas propriedades químicas do solo e no rendimento de soja e milho em rotação com pastagem consorciada de inverno no sistema de plantio direto**. 1998. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Belém.

MACEDO, M. C. M. Recuperação de áreas degradadas: pastagens e cultivos intensivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 7., 1993, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: SBSC, 1993. p. 71-72.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. spe, p. 133-146, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015.

MACHADO, L. A. Z.; GARCIA, R. A.; CONCENÇO, G. **Estabelecimento de pastagem em consórcio com soja**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2023. 35p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular Técnica 54).

MAGNABOSCO, C. U.; FARIA, C. U.; BALBINO, L. C.; BARBOSA, V.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; BARIONI, L. G.; BARCELLOS, A. O.; SAINZ, R. D. Desempenho do componente animal: experiência do Programa de Integração Lavoura e Pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 459-495.

MANZATTO, C. V.; ARAÚJO, L. S.; ASSAD, E. D.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D.; VICENTE, L. E.; PEREIRA, S. E. M.; LOEBMANN, D. G. S. W.; VICENTE, A. K. **Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC**: estimativas parciais. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. 35 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 122).

MAPBIOMAS. **Plataforma MapBiomas Uso e Cobertura**. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 15 set. 2025.

MARTINEZ, G. B.; BOTELHO, F. J. E.; BENDAHAN, A. B.; DE MORAES, A. J. G.; SILVA, A. R.; GODINHO, V. P. C.; MEDEIROS, R. D.; OLIVEIRA, T. K.; FRANKE, I. L.; PERIN, R.; MARINHO, J. T. S.; SILVA, E. S. A.; PIMENTEL, G. M. Sistemas ILPF e transferência de tecnologia nos Estados do Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia e Roraima. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil**: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos. Brasília: Embrapa, 2019. p. 45-64.

MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. Porto Alegre: UFRGS, 2015. (Boletim Técnico).

MENDES, K. R.; OLIVEIRA, P. E. S.; LIMA, J. R. S.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, E. S.; PEREZ-MARIN, A. M.; CUNHA, J. E. B. L.; MUTTI, P. R.; COSTA, G. B.; DE SÁ, T. N. M.; ARAUJO, P. A. A.; FERREIRA, R. R.; MARQUES, T. V.; RODRIGUES, D. T.; CAMPOS, S.; MELO, M. M. L. V.; SILVA, I. V. H.; MORAIS, L. F.; NASCIMENTO, F. S.; SILVA, I. B.; XAVIER, G. S.; SILVA, A. C. N.; OLIVEIRA, A. C. C. F.; REIS, J. S.; SILVA, D. F.; MEDEIROS, E. V.; OLIVEIRA, C. L.; LOPES, M. H. L.; ALVES, M. F. A. T.; ALVES, E. M.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. K. N.; PEREIRA, W. S.; BEZERRA, A. C.; SILVA, J. R. I.; ORESCA, D.; SOUZA, R. M. S.; NÓBREGA, R. L. B.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; GALVINCIO, J. D.; VON RANDOW, C.; VERHOEF, A.; BEZERRA, B. G.; SILVA, C. M. S.; ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C. The caatinga dry tropical forest: a highly efficient carbon sink in South America. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 369, p. 110573, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110573.

MONTOYA VILCAHUAMAN, L. J.; BAGGIO, A. J. Estudo econômico da introdução de mudas altas para arborização de pastagens. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECONOMIA E PLANEJAMENTO FLORESTAL, 2., 1992, Curitiba. **Anais** [...]. Colombo: Embrapa-CNPFlorestas, 1992. v. 2, p. 171-191.

MONTOYA VILCAHUAMAN, L. J.; MEDRADO, M. J. S.; MASCHIO, L. M. A. Aspectos de arborização de pastagens e viabilidade técnica-econômica da alternativa silvipastoril. In: SEMINARIO SOBRE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA REGIAO SUL DO BRASIL, 1., 1994, Colombo. **Anais** [...]. Colombo: EMBRAPA-CNPF, 1994. p. 157-172.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. de F.; SILVA, H. A.; JANSSEN, H. P. (Org.). Produção de leite em sistemas integrados de agricultura-pecuária. Curitiba: **Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural**, 2008. v. 1, 88 p.

MORAES, A.; PELISSARI, A.; ALVES, S. J. Integração lavourapecuaria no Sul do Brasil. In: ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURAPECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, 1., 2002, Pato Branco. **Anais** [...]. Pato Branco: CEFETPR, 2002. p. 342.

MORAES, S. A.; SIGNOR, D.; TONUCCI, R. G. Redesenho do sistema de produção animal sustentável CBL (Caatinga Buffel Leguminosa). In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; MARZALL, K.; SILVA, W. G. (org.). **Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros**. Brasília: MAPA, 2021. p. 158-159.

MULLER, M. D.; MARTINS, C. E.; BRIGHENTI, A. M.; ROCHA, W. S. D.; CALSAVARA, L. H. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORFIRIO-DA-SILVA, V. O eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na Mata Atlântica. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JUNIOR, J. E. (ed.). O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília: Embrapa, 2021a. p. 1087-1103.

MULLER, M. D.; MONTEIRO, R. A. C.; MARTINS, C. E.; BARROS, I.; BRIGHENTI, A. M.; ROMANO, M. R.; BALIEIRO, F. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; CALSAVARA, L. H. F.; FONSECA, N.; ANDRADE, P. J. M.; RODRIGUES, R. A. R.; ROCHA, W. S. D.; BERNARDO, W. F. **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta para produção de leite: do planejamento à produção**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2021b. 79 p.

OLIVEIRA, I. P.; KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P.; BALBINO, L. C.; FARIA, M. P.; MAGNABOSCO, C. U.; SCARPATI, M. T. V.; PORTES, T. A.; BUSO, L. H. **Sistema Barreirão**: utilização de fosfatagem na recuperação de pastagem degradada. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA-CNPAF, 1998a. 51 p. (EMBRAPA-CNPAF. Circular técnica, 31).

OLIVEIRA, I. P.; KLUTHCOUSKI, J.; BALBINO, L. C.; BUSO, L. H.; YOKOYAMA, L. P.; MAGNABOSCO, C. U.; SCARPATI, M. T. V. **Sistema Barreirão**: emprego de micronutrientes na recuperação de pastagens. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA-CNPAF, 1998b. 36 p. (EMBRAPA-CNPAF. Circular técnica, 30).

OLIVEIRA, I. P.; KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P.; BALBINO, L. C.; FARIA, M. P.; MAGNABOSCO, C. U.; SCARPATI, M. T. V.; PORTES, T. A.; BUSO, L. H. **Sistema Barreirão:** calagem e gessagem em pastagem degradada. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 36 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular técnica, 32).

OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; FAVARIN, J. L.; SANTOS, D. C. **Sistema Santa Brígida – Tecnologia Embrapa**: consorciação de milho com leguminosas. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 16 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 88).

OLIVEIRA, P.; FREITAS, R. J.; KLUTHCOUSKI, J.; RIBEIRO, A. A.; CORDEIRO, L. A. M.; TEIXEIRA, L. P.; MELO, R. A. C.; VILELA, L.; BALBINO, L. C. **Evolução de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)**: estudo de caso da Fazenda Santa Brígida, Ipameri, GO. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2013. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 318).

OLIVEIRA, P.; FREITAS, R. J.; KLUTHCOUSKI, J.; RIBEIRO, A. A.; CORDEIRO, L. A. M.; TEIXEIRA, L. P.; MELO, R. A. C. E.; SILVA, A.; VILELA, L.; BALBINO, L. C. **Evolução de Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária- Floresta (ILPF)**: estudo de caso da Fazenda Santa Brígida, Ipameri, GO. 2. ed. rev. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 318).

OLIVEIRA, P.; FREITAS, R. J.; KLUTHCOUSKI, J.; RIBEIRO, A. A.; CORDEIRO, L. A. M.; TEIXEIRA, L. P.; MELO, R. A. C.; SILVA, A.; MARCHIÓ, W.; VILELA, L.; BALBINO, L. C. Integração lavoura-pecuária-floresta: caso de sucesso da Fazenda Santa Brígida, no Estado de Goiás. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. p. 743-752.

OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. **Potencial de produção de carne carbono neutro por bovinos machos da raça Nelore em sistema silvipastoril com capim-piatã e eucalipto**: Embrapa Pecuária Sudeste – São Carlos, SP. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2022. 52 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 142).

OLIVEIRA, T. K. Sistemas integrados na Amazônia brasileira: experiências demonstrativas e resultados de pesquisa. In: LAURA, V. A.; ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G. (ed.). **Sistemas agroflorestais**: a agropecuária sustentável. Brasília: Embrapa, 2015. p. 69-95.

OLIVEIRA, F. F. **Fixação biológica de nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em cultivos irrigados de gramínea e leguminosa no Semiárido**. 2024. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE.

PACIULLO, D. S. C.; CASTRO, C. R. T.; PIRES, M. F. A.; MULLER, M. D.; XAVIER, D. F.; MORENZ, M. J. F.; GOMIDE, C. A. M.; LIMA, M. A. **Dez anos de pesquisa em um sistema silvipastoril para recria de novilhas leiteiras em áreas montanhosas**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2021. 27 p. (Embrapa Gado de Leite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 42).

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MEDRADO, M. J. S.; NICODEMO, M. L. F.; DERETI, R. M. **Arborização de Pastagens com Espécies Florestais Madeireiras**: implantação e manejo. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 48 p.

PORFIRIO-DA-SILVA, V. **Produtividade em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no subtrópico brasileiro**. Curitiba, 2012. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

PORFIRIO-DA-SILVA, V.; BEHLING, M.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; MÜLLER, M. D.; OLIVEIRA, T. K.; RIBASKI, J.; RADOMSKI, M. I.; TONINI, H.; PACHECO, A. R. Implantação e Manejo do Componente Florestal em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 81-101. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

PORFIRIO-DA-SILVA, V. O sistema silvipastoril no Paraná: uma sinopse. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO ANIMAL A PASTO, 3., 2015, Maringá. **Anais** [...]. Maringá: Sthampa, 2015. p. 253-272.

PULROLNIK, K.; MARCHAO, R. L.; VILELA, L.; GUIMARAES JUNIOR, R.; SOUZA, K. W.; MORAES NETO, S. P. **Recomendações para inserção do componente arbóreo em sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2019. 12 p. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico, 182).

REDE ILPF. **ILPF em números**. Disponível em: https://www.redeilpf.org.br/index.php/rede-ilpf/ilpf-em-numeros. Acesso em: 2021.

REIS, J. C. L. **Pastagens em Terras Baixas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1998. 34p. (Embrapa CPACT. Circular Técnica, 7).

REIS, J. C.; PEREIRA, M. A.; RICHETTI, A.; AMARO, G. C.; ARCO-VERDE, M. F. Análise econômico-financeira da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.;

VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 355-375. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

REIS, J. C.; KAMOI, M. Y. T.; LATORRACA, D.; CHEN, R. F. F.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; RODRIGUES, R. A. R.; RODRIGUES-FILHO, S. Assessing the economic viability of integrated crop-livestock systems in Mato Grosso, Brazil. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 35, n. 6, p. 631-642, 2020. DOI: http://doi.org/10.1017/S1742170519000280.

REIS, L. O. **Produção de biomassa, acúmulo de nutrientes e demanda nutricional do feijão guandu com sorgo ou milheto em consórcio e rotacionado**. 2023. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE.

RIBASKI, J.; RADOMSKI, M. I.; PORFIRIO-DA-SILVA, V. Sistemas silvipastoris em propriedades rurais no Noroeste do Estado do Paraná. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. ; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. p. 705-714.

RODRIGUES, G. S.; OLIVEIRA, P.; NOVAES, R. M. L.; PEREIRA, S. E. M.; NICODEMO, M. L. F.; SENA, A. L. S.; BELCHIOR, E. B.; ALMEIDA, M. R. M.; SANTI, A.; WRUCK, F. J. **Avaliação de impactos ambientais de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta conforme contexto de adoção**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 38 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 110).

ROSA, A. N. F.; ALVA, R. C. (ed.). **40 anos da Embrapa Gado de Corte em memória**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2017. 170 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 230).

RYSCHAWY, J.; CHOISIS, N.; CHOISIS, J. P.; JOANNON, A.; GIBON, A. Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? **Animal**, v. 6, n. 10, p. 1722-1730, 2012. DOI: http://doi.org/10.1017/S1751731112000675.

SÁ, J. L.; SÁ, C. O. **Sistema Glória de produção de leite para o semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2006. (Embrapa Semiárido. Instruções Técnicas, 77).

SAIBRO, J. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; SILVA, J. L. S.; VARELLA, A. C.; LUCAS, N. M.; SAVIAN, J. F. A integração da silvicultura com pastagens e pecuária no Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z.M. S. (org.). **Campos Sulinos**: conservação e uso sustentável da biodiversidade. 2. ed. Brasília: MMA, 2009, v. 1, p. 260-265.

SAIBRO, J. C.; SILVA, J. L. S. Integração sustentável do sistema arroz e pastagens utilizando misturas forrageiras de estação fria no litoral norte do Rio Grande do Sul. In: CICLO DE PALESTRAS EM PRODUÇÃO E MANEJO DE BOVINOS DE CORTE, 4., 1999, Canoas. **Anais** [...]. Canoas: Ed. da Ulbra, 1999. p. 27-56.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALTON, J. C.; KICHEL, A. N.; ARANTES, M.; KRUKER, J. M.; ZIMMER, A. H.; MERCANTE, F. M.; ALMEIDA, R. G. **Sistema São Mateus – Sistema de Integração Lavoura-Pecuária para a região do Bolsão Sul - Mato-grossense**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. 6 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 186).

SALTON, J. C.; OLIVEIRA, P.; TOMAZI, M.; RICHETTI, A.; BALBINO, L. C.; FLUMIGNAM, D.; MERCANTE, F. M.; MARCHÃO, R. L.; CONCENÇO, G.; SCORZA JUNIOR, R. P.; ASMUS, G. L. Benefícios da adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015a. p. 35-51. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

SALTON, J. C.; PEZARICO, C. R.; TOMAZI, M.; COMAS, C. C.; RICHETTI, A.; MERCANTE, F. M.; CONCENÇO, G.. **20 Anos de Experimentação em Integração Lavoura-Pecuária na Embrapa Agropecuária Oeste**: relatório 1995–2015. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015b. 167 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos 130).

SANTOS, C. A. Formação de pastagens em consorciação com arroz. In: ENCONTRO REGIONAL DE PESQUISA E EXTENSÃO, 1978, Diamantino, MT. **Anais** [...]. Diamantino, MT. 1978.

SCHREINER, H. G. Pesquisa em agrossilvicultura no Sul do Brasil: resultados, perspectivas e problemas. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 1., 1994, Porto Velho. **Anais** [...]. Colombo: EMBRAPA-CNPF, 1994. v. 2, p. 387-398.

SILVA, J. L. S.; VARELLA, A. C.; SAIBRO, J. C.; CASRILHOS, Z. M. S. **Manejo de animais em sistemas de integração silvipastoril**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2011. 63 p. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 447).

SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. Avaliação da adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Brasil. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil**: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos. Brasília: DF: Embrapa, 2019. p. 340-379.

SOUZA, K. W.; PULROLNIK, K.; GUIMARAES JUNIOR, R.; MARCHAO, R. L.; VILELA, L.; CARVALHO, A. M.; MACIEL, G. A.; MORAES NETO, S. P.; OLIVEIRA, A. D. **Integração lavoura-pecuária-floresta como estratégia para compensação das emissões de gases de efeito estufa**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2019. 12 p. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 39).

VILELA, L.; MIRANDA, J. C. C.; SHARMA, R. D.; AYARZA, M. A. **Integração Lavoura-Pecuária**: atividades desenvolvidas pela Embrapa Cerrados. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 31 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 9).

VILELA, L.; BARCELLOS, A. O.; SOUSA, D. M. G. **Benefícios da integração entre lavoura e pecuária**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 21 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 42).

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; BARIONI, L. G.; BARCELLOS, A. O. Integração Lavoura-Pecuária. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (ed.). **Savanas**: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Planaltina: Embrapa Cerrados; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 931-962.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B. **Integração lavoura-pecuária no Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 3 p.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; MACEDO, M.C.M.; MARCHÃO, R.L.; GUIMARÃES JUNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000003.

VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; WRUCK, F. J.; OLIVEIRA, P.; PEDREIRA, B. C.; CORDEIRO, L. A. M. Práticas e manejo de sistemas de integração lavoura-pecuária na safra e safrinha para as Regiões Centro-Oeste e Sudeste. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 103-119. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

VILELA, L.; MANJABOSCO, E. A.; MARCHAO, R. L.; GUIMARAES JUNIOR, R. **"Boi Safrinha" na Integração Lavoura-Pecuária no Oeste Baiano**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2017. 6 p. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 35).

VILELA, L.; COSTA, K. A. P.; ALVES, D. C.; EPIFANIO, P. S. **Consórcio de soja com gramíneas forrageiras no Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2021. 28 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 393).

VILELA, L.; MACIEL, G. A.; PULROLNIK, K.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JUNIOR, R.; MORAES NETO, S. P.; SOUZA, K. W.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; BARCELLOS, A. O.; BALBINO, L. C. Integração Lavoura-Pecuária e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: FALEIRO, F. G.; SILVA NETO, S. P. (ed.). **Tecnologias desenvolvidas pela Embrapa Cerrados e parceiros que transformaram o Cerrado e o Brasil**: especial 40 anos. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2022. p. 444-461.

VINHOLIS, M.M.B.; SOUZA FILHO, H.M.S.; CARRE, M.J.; BARIONI JUNIOR, W.; BERNARDO, R.; CASACA, A.A.; ROJAS, D.C.; TOKUDA, F.S.; PELINSON, G.J.B.; SANTOS JUNIOR, A.; GONÇALES JÚNIOR, I. D.; ANDRAUS, J. T. K.; JUSTO, J. S.; MARTINES, L.; GUERREIRO, M. F.; FADEL, S. A. O.; BORGES, W. L. B. **Adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em São Paulo**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2020. 56 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 47).

WRUCK, F. J.; BEHLING, M.; ANTONIO, D. B. A.; MENEGUCI, J. L. P.; TONINI, H.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; OLIVEIRA, P.; PEDREIRA, B. C.; SILVA, A. F. Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta com Componente Florestal para as Regiões Centro-Oeste e Sudeste. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 121-139. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

WRUCK, F. J.; OLIVEIRA JUNIOR, O. L.; PETERS, V. J.; PEDREIRA, B. C.; LEMOS, B. S.; SOUZA, E. D.; SILVA, F. D.; CABRAL, C. E. A.; LAROCA, J. S. V.; SOUZA, J. M. A.; BARAZETTI, A. C.; FERREIRA, B. M.; ALBUQUERQUE, L. V. **Sistema Gravataí**: consórcio de feijão-caupi com braquiárias para segunda safra. Sinop: Embrapa Agrossilvipastoril, 2018. 2 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/177789/1/2018-cpamt-flavio-wruck-sistema-gravatai.pdf. Acesso em: 2018.

YOKOYAMA, L. P.; VIANA FILHO, A.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, I. P.; BARCELLOS, A. O. Avaliação econômica de técnicas de recuperação de pastagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 8, p. 1335-1345, 1999. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000800003.

ZIMMER, A. H.; KICHEL, A. N.; FERREIRA, A. D.; DE ALMEIDA, R. G.; DE QUEIROZ, H. P. Experiências com pecuária de corte em sistema de integração lavoura-pecuária e de integração lavoura-pecuária-floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2015. p. 259-272 (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

ZONTA, J. H.; SOFIATTI, V.; SILVA, O. R. R. F.; RAMOS, E. N.; BARBOSA, H. F.; CORDEIRO JUNIOR, A. F.; LIRA, A. J. S. **Sistema Integração Lavoura-Pecuária (ILP) para a região Agreste do Nordeste**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2016. 26 p. (Embrapa Algodão. Documentos, 266).

Capítulo 2

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta em São Paulo

Marcela de Mello Brandão Vinholis, Hildo Meirelles de Souza Filho, Marcelo José Carrer, Larissa Aparecida Lopes de Souza, Leticia Caroline da Silva David, Larissa Gui Pagliuca, Rodrigo Damasceno



RESUMO: Este capítulo apresenta os resultados de dois levantamentos realizados com produtores rurais do estado de São Paulo, nos anos de 2017 e 2024, com o objetivo de compreender os fatores que influenciam a adoção dos sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Os dados evidenciam a diversidade de arranjos produtivos, e um perfil diferenciado entre adotantes e não adotantes, considerando escala de produção, acesso a crédito, acesso à informação, perfil tecnológico, bem como a experiência agrícola dos produtores. Os benefícios percebidos da ILP incluem, principalmente, a viabilização econômica da reforma de pastagens, a conservação do solo, o aumento da taxa de lotação e a diversificação da renda. Já a ILPF foi associada à melhoria do bem-estar animal, valorização ambiental da propriedade e expectativa de renda adicional com a madeira. Por outro lado, barreiras como altos custos de implantação, retorno financeiro demorado, riscos climáticos, dificuldades operacionais e ausência de mercado local ainda limitam a expansão, sobretudo do componente florestal. O estudo reforça que a ampliação da adoção dos sistemas integrados pode ser viabilizada por meio de políticas públicas efetivas, assistência técnica contínua e incentivos adaptados às diferentes realidades e perfis de produtores rurais. A ILP e a ILPF se consolidam como estratégias promissoras para a intensificação sustentável da produção, desde que articuladas com ações de capacitação, planejamento e apoio institucional.

Palavras-chave: Integração Lavoura-Pecuária (ILP); Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); Adoção de Tecnologia; Adaptação Tecnológica; Diversificação Produtiva; Políticas Públicas; Sustentabilidade Agropecuária; Comportamento do Produtor; Barreiras à Adoção; Condicionantes da Adoção.

ABSTRACT: This chapter presents the findings of two surveys conducted among rural producers in São Paulo State in 2017 and 2024. The primary objective was to understand the factors influencing the adoption of Integrated

https://doi.org/10.4322/9786586819427-2

Crop-Livestock (ICL) and Integrated Crop-Livestock-Forest Integration (ICLF) systems. The collected data underscore the diversity of production arrangements and reveal a differentiated profile between adopters and non-adopters, including production scale, access to credit, access to information, technological profile, and the producers' agricultural experience. The perceived benefits of ICL primarily include the economic viability of pasture renovation, soil conservation, increased stocking rate, and income diversification. ICLF, on the other hand, was associated with improved animal welfare, enhanced environmental conditions on the property, and the expectation of additional income from timber. Conversely, key barriers, including high implementation costs, delayed financial returns, climate risks, operational difficulties, and the absence of a local market, continue to constrain expansion, particularly of the forestry component. The study reinforces the idea that the adoption of integrated systems can be accelerated by effective public policies, continuous technical assistance, and incentives tailored to the diverse realities and profiles of rural producers. ICL and ICLF systems are consolidating as promising strategies for the sustainable intensification of production, provided they are linked to initiatives focused on training, planning, and institutional support.

Keywords: Integrated Crop-Livestock (ICL); Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF); Technology Adoption; Technological Adaptation; Productive Diversification; Public Policies; Agricultural Sustainability; Farmers' Perception; Adoption Barriers; Drivers of Adoption.

2.1 INTRODUÇÃO

A adoção de práticas sustentáveis tem ganhado cada vez mais espaço no setor agropecuário brasileiro, especialmente diante dos desafios relacionados à degradação ambiental e à necessidade de intensificação da produção sem expandir a fronteira agrícola (Nie et al., 2016). Nesse contexto, os sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) vêm sendo promovidos como uma alternativa viável para aliar produtividade e conservação dos recursos naturais. Esses sistemas consistem na combinação planejada e integrada de atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais em uma mesma área, ao longo do tempo ou de forma simultânea, com o objetivo de aproveitar as sinergias entre os componentes produtivos. Os ganhos associados vão desde a recuperação de pastagens degradadas, até o aumento da renda e o bem-estar animal, passando por melhorias na qualidade do solo e na resiliência frente a mudanças climáticas (Garrett et al., 2017; Bernardon et al., 2021).

No estado de São Paulo, o uso desses sistemas tem sido estimulado por políticas públicas como o Plano ABC e o Plano ABC+, que estabelecem metas para práticas de baixa emissão de carbono, e pela Política Estadual de Mudanças Climáticas, que reconhece os sistemas integrados como ferramentas estratégicas para a sustentabilidade agropecuária (Mozzer, 2011; Carauta et al., 2021; Oliveira et al., 2022). Apesar disso, a adesão ainda ocorre de forma desigual entre regiões e produtores, variando conforme condições de solo, clima, mercado, infraestrutura e, especialmente, características do sistema de produção e do próprio produtor rural (Vinholis et al., 2021a).

Com o objetivo de compreender melhor esse cenário, foram realizados dois levantamentos de campo junto a produtores rurais paulistas com atividade de pecuária a pasto, com foco específico na adoção de sistemas ILPF (integração lavoura-pecuária-floresta) e ILP (integração lavoura-pecuária). Ambos os estudos utilizaram dados de questionários estruturados aplicados diretamente aos produtores, buscando captar informações detalhadas sobre o sistema produtivo, o perfil dos tomadores de decisão e as condições de adoção.

Em ambos os levantamentos, a amostra foi composta por produtores que adotavam os sistemas de integração, enquanto uma contra-amostra incluiu pecuaristas não adotantes selecionados em municípios da mesma região agropecuária. Dessa forma, permitindo comparações consistentes entre os dois grupos com base em contextos territoriais semelhantes. Essa estratégia identificou os fatores que favorecem ou limitam a adoção, levando em consideração as realidades locais, os diferentes arranjos produtivos e os perfis dos tomadores de decisão.

O presente capítulo tem por objetivo sistematizar os principais resultados obtidos nesses dois levantamentos, com ênfase em três eixos de análise: (i) os diferentes arranjos dos sistemas de integração observados em São Paulo; (ii) o perfil dos produtores que adotam esses sistemas e os fatores que influenciam essa decisão; e (iii) as barreiras e os benefícios percebidos pelos produtores, com base nos dados quantitativos e nas falas registradas durante as entrevistas.

1º levantamento (Vinholis et al., 2020a): conduzido em 2017, abrangeu 175 propriedades rurais, sendo 66 adotantes de ILP, 24 adotantes de ILPF e 85 não adotantes. Financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Fapesp (processo nº 2015/16.793-5);

2º levantamento: realizado em 2024, com foco exclusivo na adoção de sistemas de integração lavoura–pecuária (ILP), abrangeu 121 propriedades rurais, das quais 53 adotantes de ILP e 68 não adotantes. Financiada pela Fapesp (processo nº 2022/02967-5); e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, (processo nº 404187/2023-4).

2.2 DIVERSIDADE DE ARRANJOS NOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO EM SÃO PAULO

A adoção dos sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no estado de São Paulo tem ocorrido de maneira heterogênea, refletindo tanto as especificidades das regiões quanto as condições edafoclimáticas, de mercado e a experiência dos produtores (Vinholis et al., 2020a, 2021a). Essa diversidade de arranjos é uma das principais características desses sistemas, que, ao combinarem componentes agrícolas, pecuários e florestais de forma planejada, promovem a intensificação sustentável da produção.

Antes de explorar as configurações técnicas adotadas, é importante compreender a distribuição espacial das propriedades com adoção de sistemas integrados nos dois levantamentos realizados. As Figura 2.1 e Figura 2.2 apresentam a localização das propriedades entrevistadas nos anos de 2017 e 2024, respectivamente, diferenciando entre produtores adotantes e não adotantes. Os mapas evidenciam que a mesorregião de Presidente Prudente concentra uma parcela significativa das propriedades com ILP, o que pode ser atribuído a fatores como a predominância de solos arenosos, que exigem maior cuidado com a conservação do solo e favorecem a adoção de sistemas como a ILP, e as restrições impostas pelo zoneamento agrícola de risco climático ao cultivo de grãos na segunda safra, o que estimula o uso estratégico da pastagem como alternativa na entressafra, dentro do modelo de integração.

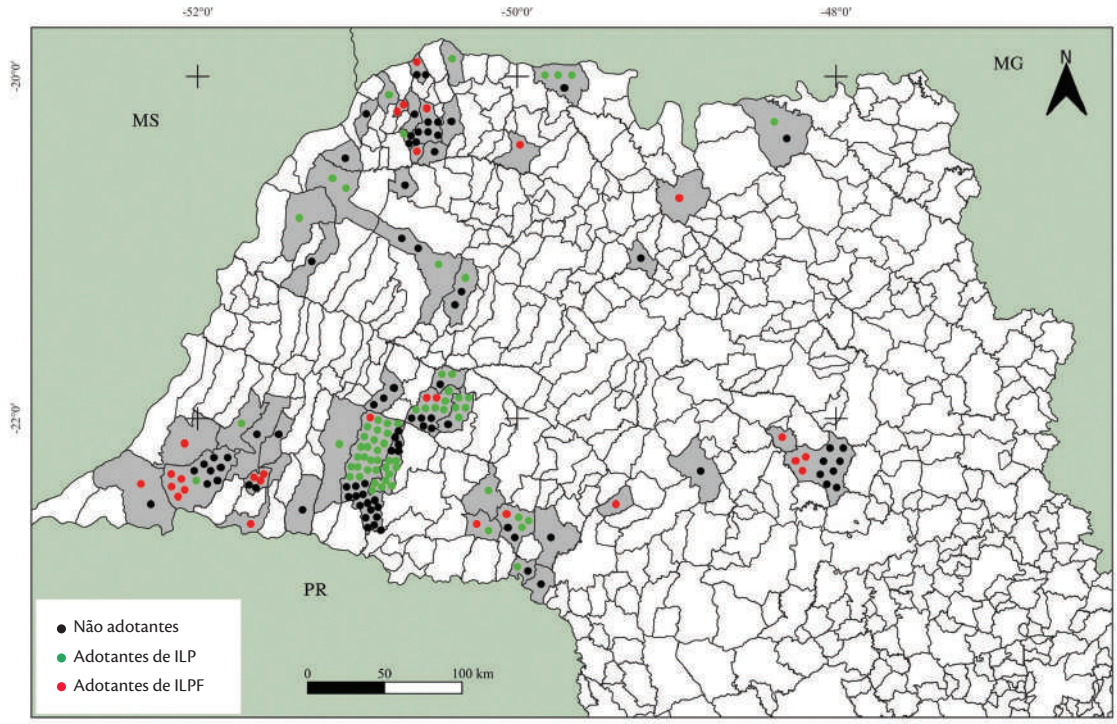
2.2.1 Integração lavoura-pecuária (ILP)

No levantamento realizado em 2017, o sistema ILP representava 38% da amostra, com 66 propriedades adotantes. Dois modelos organizacionais foram identificados entre essas experiências: (i) o cultivo agrícola em rotação com pastagens realizado pelo pecuarista proprietário da terra (67% dos casos) e (ii) arranjos estabelecidos em parceria ou arrendamento de longo prazo entre o pecuarista proprietário da terra e produtores não proprietários especializados na produção agrícola (33%). Em ambos os casos, observou-se a prática de rotação de culturas agrícolas em aproximadamente 20% da área total de pastagens como estratégia para recuperação de solo e intensificação sustentável do uso da terra.

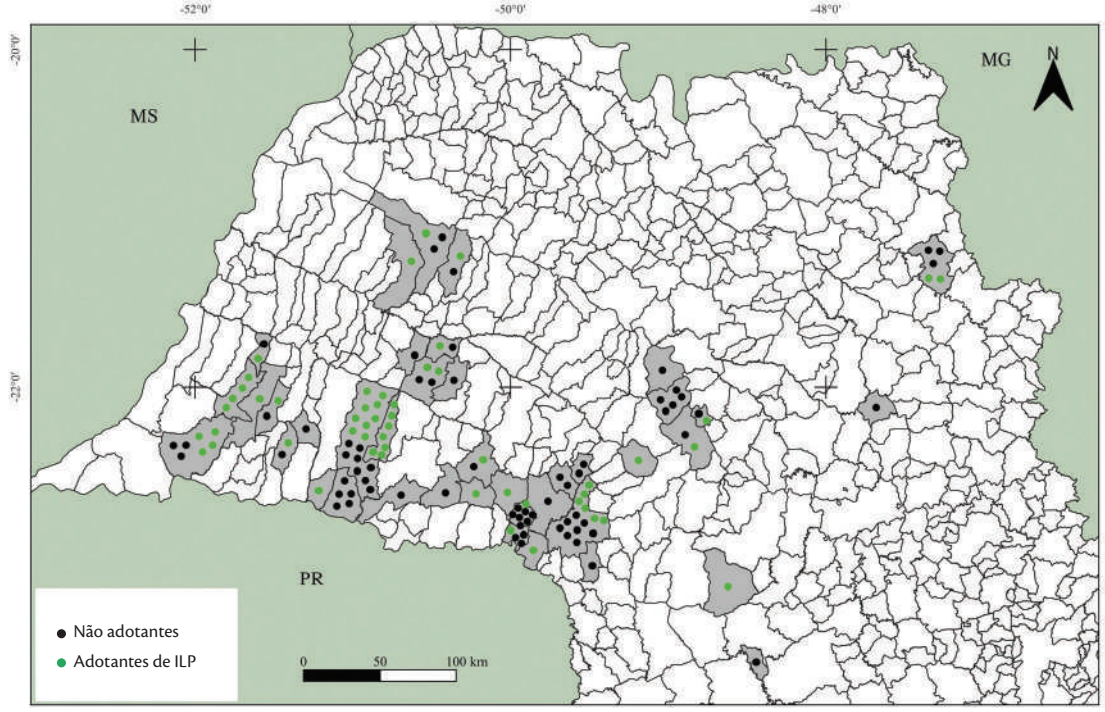
A diversidade de culturas utilizadas nas áreas de ILP em 2017 está representada na Figura 2.3, evidenciando a soja como a principal cultura agrícola, presente em cerca de 45% das propriedades. Em seguida, destacaram-se o amendoim (26%) e o milho em rotação simples (18%), com ocorrência pontual de outras culturas, como batata-doce, mandioca, abacaxi e abóbora, geralmente associadas a nichos regionais de mercado.

A soja foi a principal cultura de verão, sendo cultivada em 30 propriedades. A definição da cultura para a segunda safra variava conforme a aptidão agrícola e as restrições climáticas regionais. Em Assis e Guaíra, predominava o consórcio de milho safrinha com braquiária (*Urochloa ruziziensis*, syn. *Brachiaria ruziziensis*), enquanto em áreas com maiores limitações edafoclimáticas, como Rancharia e João Ramalho, optava-se pela implantação direta da forrageira ("pasto safrinha"). Essas decisões refletiam não apenas fatores técnicos, mas também as recomendações do zoneamento agrícola de risco climático.

A escolha das culturas variava ainda conforme a dinâmica de mercado local e a presença de apoio institucional. Em Tupã, por exemplo, a rotação com amendoim e mandioca era favorecida pela atuação de associações de produtores e pela presença da agroindústria de fécula de mandioca. Em outras localidades, como



ILP: integração lavoura-pecuária; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta.
Figura 2.1. Distribuição geográfica da amostra no Estado de São Paulo – 2017.
Fonte: Dados da pesquisa em 2017.



ILP: integração lavoura-pecuária.
Figura 2.2. Distribuição geográfica da amostra no Estado de São Paulo – 2024.
Fonte: Dados da pesquisa em 2017.

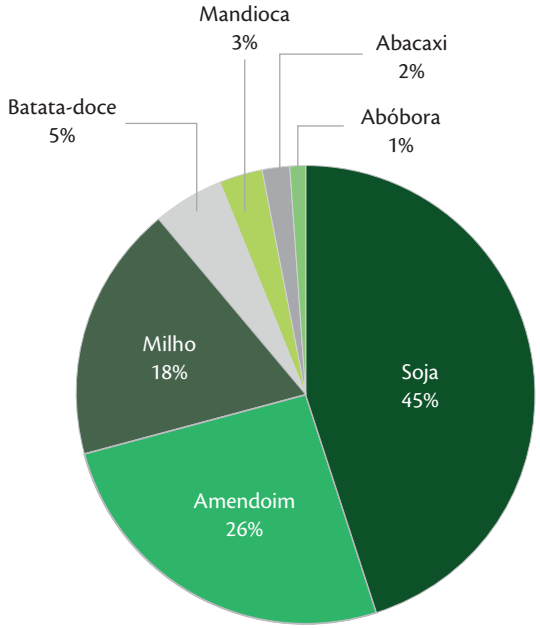


Figura 2.3. Distribuição percentual das principais culturas agrícolas utilizadas no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) – 2017.

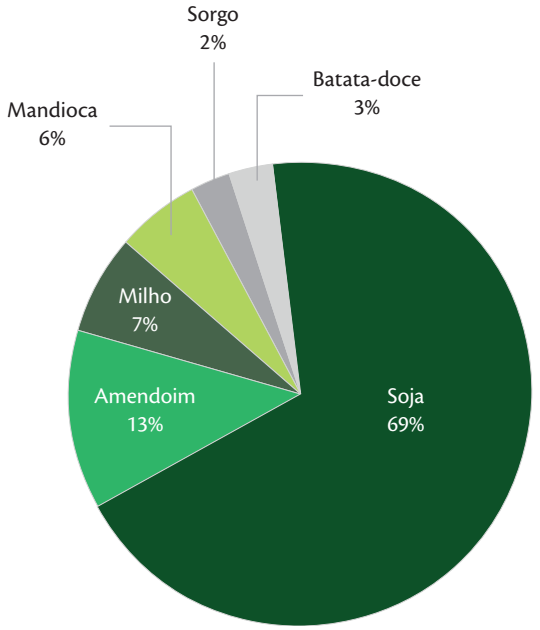


Figura 2.4. Distribuição percentual das principais culturas agrícolas utilizadas no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) – 2024.

Castro, o milho era cultivado em função da integração com sistemas avícolas, enquanto casos isolados de batata-doce e abacaxi foram observados em Presidente Prudente e Andradina, respectivamente.

Essa diversidade ilustra a flexibilidade do sistema ILP, capaz de se ajustar tanto às condições agroecológicas da propriedade quanto às exigências e oportunidades do mercado regional.

No segundo levantamento, realizado em 2024, entre as 53 propriedades que adotavam o sistema ILP, observou-se uma consolidação da soja como principal cultura agrícola na rotação, presente em 69% das propriedades. As demais culturas identificadas foram: amendoim (13%), milho (7%), mandioca (6%), batata-doce (3%) e sorgo (2%), conforme apresentado na Figura 2.4.

Esse padrão aponta para uma tendência de especialização na cultura da soja que se expandiu no estado de São Paulo. Conforme dados da Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE, 2025), entre os anos de 2013 e 2023, a área plantada de soja em São Paulo aumentou em 114% e, na mesorregião de Presidente Prudente, aumentou em 123% (Figura 2.5). A mesorregião de Presidente Prudente concentra os sistemas ILP da amostra (53% em ambas as pesquisas), em sua maioria com soja.

Em 2024, os cultivos de amendoim e mandioca se mantiveram significativos em regiões como Tupã, onde a infraestrutura local e o apoio de associações e agroindústrias favoreceram essas cadeias produtivas. Observou-se também a rotação com milho e sorgo, o que confirma o uso frequente de consórcios com forrageiras, prática amplamente consolidada de recuperar pastagens e intensificar o uso da área de forma sustentável.

A comparação entre os dois períodos revela, portanto, uma evolução nos arranjos do sistema ILP no estado de São Paulo: ao mesmo tempo em que se consolida o protagonismo da soja, permanece a diversidade de estratégias produtivas, evidenciando a capacidade adaptativa do sistema frente às condições locais e aos desafios de mercado.

Cada produtor informou o ano em que adotou o sistema ILP. A partir dessa informação, obteve-se a adoção acumulada no tempo, também conhecida como difusão da inovação (Geroski, 2000). A Figura 2.6 apresenta essa evolução para os dois levantamentos, observando-se a difusão de 1992, quando ocorreu a primeira adoção, até o ano de 2023. Nota-se que a difusão cresce de forma mais acelerada a partir de 2012 e no último ano do levantamento de 2024.

2.2.2 Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) englobam tanto modelos com a combinação de pastagem e árvores, quanto arranjos mais complexos

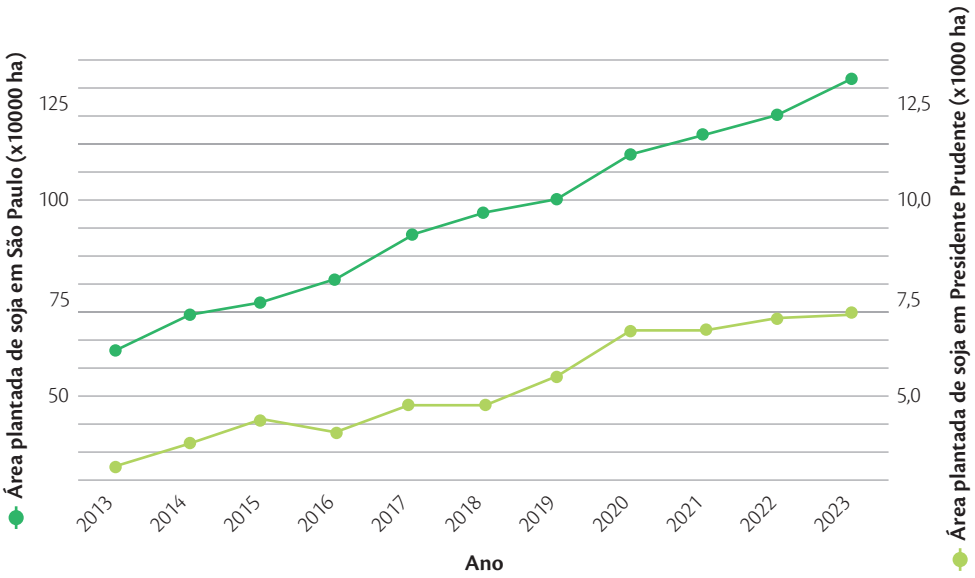


Figura 2.5. Área de soja plantada em São Paulo.
Fonte: IBGE, 2025.

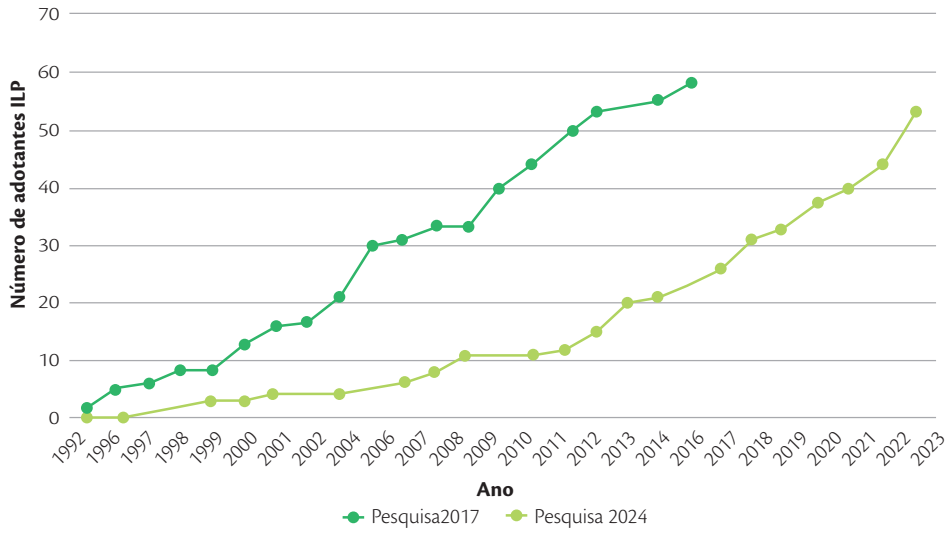


Figura 2.6. Adoção acumulada dos sistemas integração lavoura-pecuária (ILP) em São Paulo, amostras de 2017 e 2024.

que incluem lavouras, pecuária e florestas em rotação, sucessão ou consórcio, em uma mesma área.

No levantamento realizado em 2017, 24 propriedades (14% da amostra) adotavam sistemas com componente florestal. Dentre essas, 20 propriedades praticavam a integração pecuária-floresta (IPF) e quatro adotavam o modelo completo ILPF. Para fins de análise, ambas foram tratadas como variações de um sistema integrado com inserção arbórea (ILPF).

Esses sistemas apresentaram variação nos arranjos produtivos, com predominância do eucalipto como espécie florestal principal (presente em 22 propriedades), seguido pelo mogno (duas propriedades). A escolha da inserção do componente arbóreo em áreas de pastagens esteve, em muitos casos, associada ao aproveitamento de áreas marginais da propriedade rural, que passaram a ser utilizadas de forma mais eficiente com o consórcio de árvores e pastagem, evidenciando

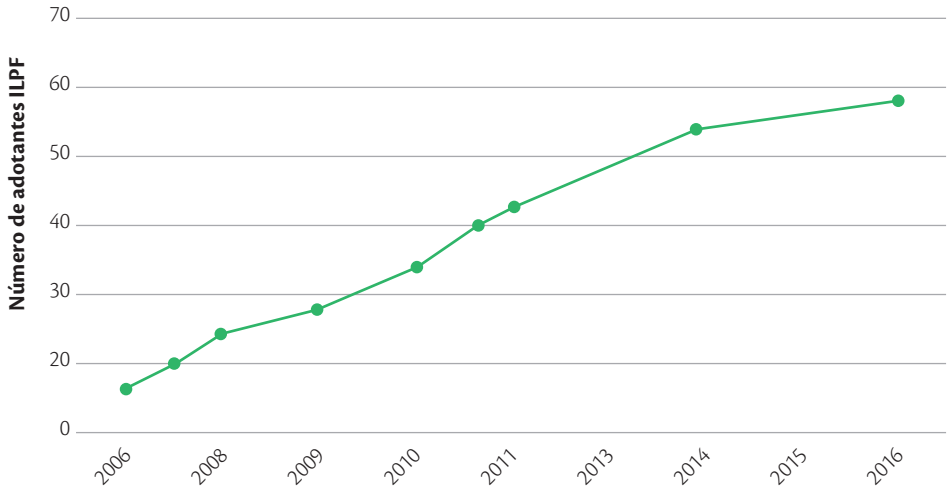


Figura 2.7. Adoção acumulada dos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em São Paulo, amostra de 2017.

uma estratégia de diversificação produtiva e conservação ambiental.

Observou-se em 2017 grande variação de espaçamentos entre renques e linhas de árvores, evidenciando a fase inicial do processo de difusão de sistemas ILPF e a experimentação da tecnologia no campo. A Figura 2.7 apresenta a difusão desses sistemas a partir dos dados coletados em 2017, quando ainda havia poucos adotantes.

A densidade média de árvores foi de 639 árvores por hectare (variando de 167 a 1.535 árvores por hectare), com valores superiores às recomendações técnicas, o que sugere a necessidade de desbaste e a condição jovem e experimental dos povoamentos em 2017 (Pezzopane et al., 2024). Em alguns casos, os arranjos foram implantados gradativamente no tempo e no espaço, ou seja, a arborização ocorreu em parcelas de pastagens implementadas sucessivamente ao longo dos anos. Esta condição favoreceu a adoção da tecnologia por produtores rurais com menor escala de produção. Todos os sistemas integrados com árvores foram implementados em terras próprias, sem arrendamento ou parceria.

Do ponto de vista zootécnico, o componente florestal foi incorporado com diferentes objetivos, a depender da região e do tipo de pecuária. Nas regiões de Jales e Mirante do Paranapanema, a ILPF esteve majoritariamente associada à pecuária leiteira, com 80% e 70% dos produtores, respectivamente, utilizando o sistema para promover conforto térmico e sombreamento do rebanho, além de renda adicional. Em Brotas, a adoção ocorreu principalmente na cria e recria da pecuária de corte, visando melhorar o bem-estar de animais jovens em áreas de pastagem arborizada, além da diversificação da renda.

Em quatro propriedades, a lavoura foi incluída no sistema como estratégia inicial, especialmente com o cultivo de milho em consórcio com as mudas florestais. Essa prática protege as árvores nos primeiros anos, otimiza o uso da terra e contribui com o fluxo de caixa da atividade.

A diversidade de configurações observadas nos sistemas com árvores reflete a natureza adaptável da ILPF, que permite combinações distintas conforme a realidade de cada propriedade. Seja com foco na madeira, no bem-estar animal, na conservação ambiental ou na diversificação da produção, o componente florestal tem se mostrado uma ferramenta estratégica para a sustentabilidade.

O sucesso da adoção está diretamente relacionado à capacidade de planejamento e gestão do produtor, ao alinhamento com as condições locais e à disposição para investir em um sistema de retorno financeiro progressivo. Assim, o sistema ILPF representa não apenas uma alternativa técnica viável, mas uma abordagem integrada de uso do solo, com potencial para conciliar produtividade, conservação dos recursos naturais e adaptação às mudanças climáticas.

Importante destacar que os dados apresentados nesta seção se referem exclusivamente ao levanta-

mento realizado em 2017. A pesquisa de 2024 concentrou-se na análise de sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP), não tendo incluído propriedades com adoção do componente florestal.

2.3 PERFIL DA ADOÇÃO DE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

2.3.1 Integração lavoura-pecuária

Observou-se que o perfil dos produtores que adotam os sistemas ILP e ILPF é diferente dos produtores que não os adotam. Dados obtidos por meio das entrevistas realizadas em 2017 e 2024 foram analisados por meio de Análise de Correspondência Múltipla (ACM) e regressão logística, permitindo identificar características estruturais, tecnológicas e gerenciais associadas à adoção, bem como contrastes entre os grupos analisados. Embora fatores edafoclimáticos e de mercado exerçam influência, a decisão pela adoção também está associada às características produtivas e ao perfil do tomador de decisão (Souza Filho et al., 2011; Vinholis et al., 2020a). A Figura 2.8 apresenta uma síntese das principais características que diferenciaram os adotantes de ILP dos não adotantes, em 2017 e em 2024.

Em 2017, os produtores adotantes de ILP apresentavam um perfil de maior intensidade tecnológica, associado a maior escala de produção (Vinholis et al., 2021c, 2022). A maioria possuía áreas acima de 300 hectares, uma média de 3,29 tratores por propriedade e dois ou mais trabalhadores mensalistas (Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2021a). Esse perfil está alinhado à ideia de que grandes propriedades, especialmente aquelas com agricultura consolidada, possuem maior capacidade de investimento em capital fixo e capturam economias de escala e escopo.

O acesso à informação também se destacou (Vinholis et al., 2021b, 2022). Os adotantes participavam com maior frequência de palestras técnicas e dias de campo, tinham presença mais ativa em cooperativas e recebiam mais visitas de assistência técnica. Estimativas da pesquisa indicam que a assistência técnica especializada em ILP aumentava em 17% a probabilidade de adoção (Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2021a, 2021c).

Quanto ao acesso ao crédito rural, mais de 70% dos adotantes obtiveram financiamento, sendo a maior parte por meio de linhas tradicionais voltadas ao custeio



Figura 2.8. Perfil dos adotantes de integração lavoura-pecuária (ILP) em São Paulo – 2017 e 2024.

agrícola. Apenas 24% recorreram ao Programa ABC (atual RenovAgro), o que indica que, embora a política pública específica para tecnologias de baixa emissão de carbono tenha papel relevante, sua utilização ainda pode ser ampliada (Carrer et al., 2020; Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2021a, 2021b, 2021c, 2022).

Outro traço marcante foi o perfil inovador dos adotantes, medido por um indicador que considera disposição para experimentar novas tecnologias, assumir desafios e buscar soluções diante de imprevistos. Esse indicador foi positivo e estatisticamente significativo para explicar a adoção (Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2021b).

A experiência agrícola prévia também teve peso relevante: produtores com histórico no cultivo de lavouras apresentaram aumento de 20,8% na probabilidade de adotar ILP, provavelmente por lidarem melhor com as complexidades técnicas e perceberem menor risco (Souza Filho et al., 2021).

Fatores físicos das propriedades também influenciaram: terrenos planos e solos arenosos foram mais comuns entre adotantes, e, neste último caso, a adoção traz ganhos expressivos em estrutura do solo, produtividade e retorno econômico (Souza Filho et al., 2021).

Em relação à taxa de lotação animal, em 2017 os adotantes de ILP apresentaram média de 1,89 UA/ha, superior à dos não adotantes (1,47 UA/ha), diferença estatisticamente significativa ao nível de 1% na amostra total. Essa diferença foi ainda mais expressiva na mesorregião de Presidente Prudente (1,85 contra 1,32 UA/ha).

Os resultados de 2024 confirmam a manutenção de um perfil produtivo com maior intensidade tecnológica entre os adotantes. A escala de produção continuou sendo um diferencial, com predomínio de propriedades acima de 200 hectares[1].

No acesso à informação, houve ampliação da contratação de consultorias: 38% dos adotantes buscaram esse serviço, contra 22% dos não adotantes. O acesso ao crédito rural também permaneceu mais frequente entre adotantes (46,3% contra 40,3%), ainda que a maioria tenha utilizado linhas tradicionais de custeio, e não necessariamente programas específicos para sistemas ILP, como o Integra São Paulo e o RenovAgro[2].

O perfil tecnológico evoluiu, com destaque para a adoção de tecnologias digitais, tanto para o gerenciamento da atividade quanto para práticas agronômicas. Entre os adotantes, 19,4% utilizavam softwares de gestão financeira (contra 3,2% dos não adotantes), 17,9% utilizavam softwares de gestão zootécnica (contra 4,8%) e 25,4% utilizavam balanças eletrônicas, brincos eletrônicos de rastreamento e drones (contra 16,1%)[3]. Embora o uso dessas tecnologias ainda não seja muito difundido, elas estão mais presentes entre os adotantes, indicando que a maior intensidade tecnológica tem papel importante na eficiência e na tomada de decisão. Do ponto de vista agronômico, práticas consolidadas como correção e adubação de manutenção de pastagens foram mais comuns entre os adotantes (52,2% contra 43,5% dos não adotantes), sinalizando maior preocupação com a fertilidade do solo e a produtividade da forragem[4].

Em 2024, a taxa média de lotação animal na amostra total foi semelhante entre adotantes (1,86 UA/ha) e não adotantes (1,84 UA/ha). No entanto, na mesorregião de Presidente Prudente, onde o ILP está mais consolidado, observou-se diferença estatística ao nível de 10%: 2,01 UA/ha para adotantes contra 1,50 UA/ha para não adotantes. A Figura 2.9 ilustra as diferenças entre as taxas de lotação da mesorregião de Presidente Prudente no ano de 2017 e 2024, reforçando o potencial do ILP na intensificação sustentável da pecuária em regiões tradicionais de produção pecuária e onde está mais consolidado.

2.3.2 Integração lavoura-pecuária-floresta

Os dados de 2017 mostraram que o perfil dos produtores que adotaram ILPF apresentava algumas características distintas das dos não adotantes, como apresentado na Figura 2.10.

Em 2017, a maioria dos adotantes de ILPF possuía escala de produção menor, frequentemente com propriedades inferiores a 150 hectares. A estrutura de maquinário era mais limitada, com média de 1,46 tratores por propriedade, e a mão de obra mensalista era reduzida, predominando o uso de trabalhadores

[1] SOUZA, L. A. L. et al. Perfil dos adotantes de sistemas de produção que integram lavoura-pecuária no estado de São Paulo: uma análise de correspondência múltipla. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2025, Natal. Anais eletrônicos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), 2025. Disponível em: https://abepro.org.br/publicacoes/. Acesso em: 18 nov. 2025.

[2] SOUZA, op. cit.
[3] SOUZA, op. cit.
[4] SOUZA, op. cit.

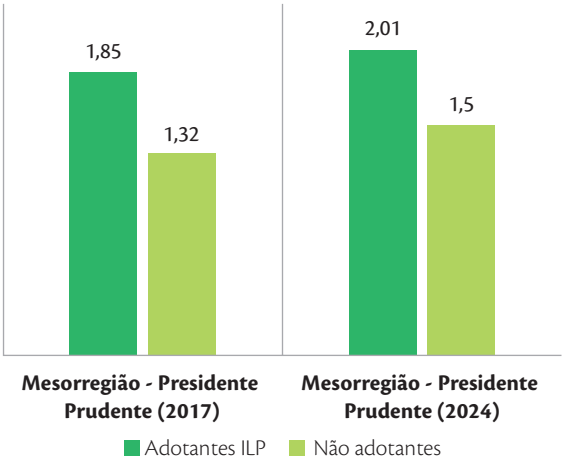


Figura 2.9. Taxa de lotação animal em propriedades com e sem adoção de integração lavoura-pecuária (ILP) (UA/ha) – resultados pesquisas 2017 e 2024.



Figura 2.10. Perfil dos adotantes de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (2017) no Estado de São Paulo.

temporários (mais de 50 diárias/ano) (Vinholis et al., 2020a). Os rebanhos eram de menor porte e a taxa média de lotação (1,27 UA/ha) era inferior à observada em propriedades com ILP (1,47 UA/ha). A atividade produtiva estava mais associada à pecuária leiteira, notadamente nas fases de cria e recria (Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2021a).

A maior experiência com agricultura mostrou-se determinante: 91% dos adotantes possuíam histórico de cultivo de lavouras. Esse conhecimento prévio facilita o manejo do sistema, reduz a percepção de riscos e favorece a tomada de decisão, especialmente nos primeiros anos de implantação do componente arbóreo em consorciação com lavoura (Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2020a, 2021a).

O acesso ao crédito também teve papel relevante: 54% dos adotantes obtiveram financiamento, a maioria por meio de linhas tradicionais. Somente 29% acessaram o Programa ABC, sinalizando que o uso de instrumentos de política pública voltados à integração ainda não era amplamente difundido (Souza Filho et al., 2021; Vinholis et al., 2020a, 2021a, 2021b).

No aspecto físico, muitas áreas com ILPF apresentavam relevo mais ondulado e solos de menor fertilidade, geralmente arenosos (Vinholis et al., 2020a). A espécie arbórea predominante foi o eucalipto. Em alguns casos, a implantação do componente florestal era feita de forma gradual e utilizando recursos próprios. Para esses produtores, a arborização era vista como estratégia de melhoria do conforto térmico dos animais, diversificação de renda e valorização paisagística (Souza Filho et al., 2021).

Os produtores não adotantes de ILP e ILPF em 2017, bem como os não adotantes de ILP em 2024, apresentaram perfil mais tradicional e conservador. Eram, em geral, pecuaristas de corte com pouca ou nenhuma experiência com agricultura, propriedades menores e menos mecanizadas, baixa diversificação produtiva e limitada adoção de práticas de manejo de solo, como a correção e adubação de pastagens. Além disso, tiveram menor acesso ao crédito, participação reduzida em cooperativas e eventos técnicos, e baixo uso de tecnologias digitais ou softwares de gestão. Embora alguns conhecessem os sistemas integrados, a adoção era dificultada por fatores como percepção de elevado risco climático e de mercado, altos custos de implantação e ausência de apoio técnico e financeiro.

A análise integrada das duas pesquisas (2017 e 2024) reforça que a adoção dos sistemas ILP e ILPF está associada a fatores estruturais (escala de produção, mecanização), humanos (experiência agrícola, perfil

inovador) e de suporte (acesso a crédito, assistência técnica e uso de ferramentas de gestão). A ausência desses elementos reduz a probabilidade de adoção, tema que será aprofundado no Capítulo 5.

2.4 BENEFÍCIOS DA ADOÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

A decisão de adotar sistemas integrados como ILP e ILPF está associada às percepções dos produtores quanto aos benefícios e às barreiras enfrentadas. Esta seção apresenta as percepções de produtores adotantes e não adotantes, com base nas pesquisas de 2017 e 2024.

2.4.1 Integração lavoura-pecuária

Os resultados das pesquisas de 2017 e 2024 mostram que a principal motivação para a adoção do ILP foi a possibilidade de recuperar a qualidade das pastagens de forma economicamente viável, utilizando a lavoura como estratégia para reduzir custos e melhorar a conservação do solo.

A Figura 2.11 apresenta a nuvem de palavras gerada com base nas respostas espontâneas dos produtores entrevistados em 2017 e em 2024. O tamanho da letra reflete a frequência de respostas espontâneas em cada tópico. Quanto maior a letra, mais vezes o tópico foi citado pelos produtores rurais. Em ambos os anos, destaca-se a predominância do termo "*melhoria da qualidade do pasto*" como o principal benefício percebido da adoção de sistemas ILP, seguido do aumento da "*taxa de lotação*" em 2017 e da "*conservação do solo*" em 2024.

Em 2017, os benefícios do sistema ILP mais citados estavam relacionados a ganhos da produção pecuária. A reforma e melhoria da qualidade da pastagem foi mencionada por metade dos produtores adotantes (50%). De forma geral, este benefício estava associado ao incremento da taxa de lotação (citado por 11,5% dos produtores), ao aumento da rentabilidade da pecuária (7,7%) e a redução do custo da reforma do pasto (1,3%), ilustrado pelos dizeres dos produtores como "*reforma de pasto e aumento de lotação animal*", "*reforma do pasto sem gastar nada*", "*reforma de pasto a um custo menor*", ou ainda a maior oferta de alimento para os animais na seca (citado por 7,7% dos produtores), seja por meio do pasto renovado, seja suplementação com silagem produzida nas águas.

Em seguida foram mencionados benefícios relacionados ao mercado, meio ambiente e lavoura, como a diversificação da produção (5,1%) para minimizar riscos de mercado, o aumento da resiliência a eventos climáticos extremos (5,1%), a melhor conservação do solo (3,8%) associada ao aumento de matéria orgânica e a maior retenção de umidade no solo, e a melhoria do controle de pragas na lavoura (2,6%), conforme mencionado por um produtor: "*comecei para diversificar a renda e reduzir o risco, em ano de intempérie na*

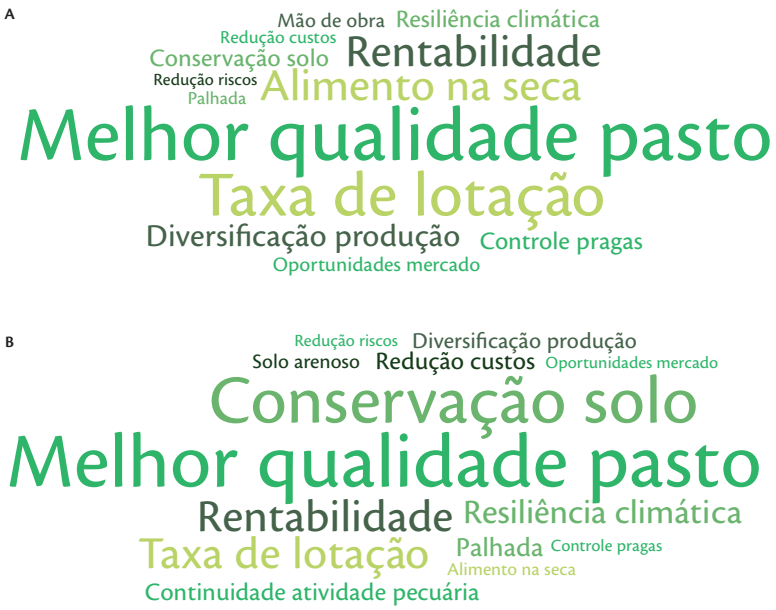


Figura 2.11. Benefícios percebidos por adotantes de sistema integração lavoura-pecuária (ILP) em 2017 (A) e em 2024 (B).

lavoura, tem o gado pra vender e não perde muito". Demais tópicos foram citados pontualmente. Vinholis et al. (2020b) verificaram benefícios econômicos e redução de risco associados ao sistema ILP.

A pesquisa de 2024 mostrou que a reforma e melhoria da qualidade das pastagens continua como a principal motivação e benefício percebido (mencionado por 19,4% dos produtores adotantes), novamente associada à melhoria de taxa de lotação (10,4%) e ao aumento do retorno financeiro da pecuária (10,4%), conforme ilustra um produtor: "*comecei a adotar para melhorar a Brachiaria brizantha. No ILP, o custo com a reforma de pasto e do trator ficam para a soja. Além disso, percebi o pasto melhor, consegui maior taxa de lotação e reduzi o ciclo da engorda, ou seja, melhorei meu capital de giro*".

No entanto, em 2024 questões relacionadas ao meio ambiente aparecem num percentual maior. A conservação do solo – associada ao aumento da matéria orgânica, a maior retenção de umidade no solo, a redução de erosão e a melhoria da fertilidade do solo – assume o segundo lugar na percepção dos produtores (16,7%). O aumento da resiliência do sistema em anos de eventos climáticos mais intensos (como a seca) foi citado por 6,2% dos produtores. O comentário de um produtor ilustra essa percepção: "*ruzizienses é um seguro para a soja com relação ao estresse hídrico, pois protege a umidade do solo*".

Demais vantagens do sistema ILP foram mencionadas pontualmente.

2.4.2 Integração lavoura-pecuária-floresta

A pesquisa de 2017 também avaliou os objetivos e os benefícios percebidos e esperados pelos produtores adotantes de sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), apresentados na Figura 2.12.

A diversificação da renda por meio da introdução do componente arbóreo nos sistemas de produção foi a principal motivação e benefício esperado da adoção (citado por 26,5% dos produtores), com destaque para o cultivo de eucalipto. Estes produtores associaram o componente florestal como oportunidade para a obtenção de renda adicional futura (20,6%), conforme relatado por um produtor: "*o IPF permitiu manter a mesma quantidade de carne com o complemento da renda do eucalipto após 5 anos*", ou ainda outro produtor que tinha na mesma propriedade uma área com sistema ILP e outra com sistema ILPF: "*o ILP foi para melhorar o solo, ter alimento para o gado na seca e aumentar a produtividade. A árvore foi para sombra para o gado e para diversificar a renda da propriedade*".

A vantagem do conforto térmico para os animais, especialmente em épocas de temperaturas mais elevadas e anos com veranico intenso, foi percebido por 17,6% dos produtores, conforme comentou um produtor: "*adotei para ter sombra para o gado e para melhorar o bem-estar*". Outro benefício esperado do consórcio de árvores e pastagem foi a melhoria da qualidade da pastagem (citado por 11,8% dos produtores), seguido do aumento da taxa de lotação e conservação do solo associada à redução da erosão por meio do plantio das árvores em curvas de nível (ambos 5,9%).

Em resumo, os dados demonstram que os benefícios percebidos ou esperados pelos produtores são múltiplos e refletem o potencial dos sistemas integrados para promover maior eficiência produtiva, resiliência climática, conservação de recursos naturais e viabilidade econômica das propriedades. No caso do ILP, os ganhos são fortemente associados à recuperação e melhoria da qualidade de pastagens, intensificação da produção e redução do ciclo pecuário e conservação do solo. No caso do ILPF, os benefícios estão concentrados na diversificação da renda, na valorização ambiental da propriedade e no bem-estar

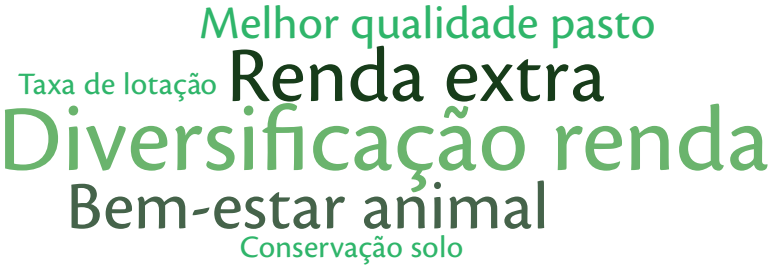


Figura 2.12. Benefícios percebidos ou esperado por adotantes do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em 2017.

animal. Ambas as estratégias se revelam complementares e promissoras para a sustentabilidade.

2.5 PERCEPÇÕES SOBRE AS BARREIRAS À ADOÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

2.5.1 Integração lavoura-pecuária

As barreiras à adoção dos sistemas integrados foram diversas e, em muitos casos, refletem a ausência de condições que favoreçam a adoção. A Figura 2.13 apresenta as barreiras relatadas por produtores não adotantes de ILP em 2017 e em 2024.

Em 2017, alguns fatores de produção importantes foram apontados como limitantes para a adoção de sistemas ILP, como a falta de maquinários adequados para a produção agrícola (citado por 14,1% dos produtores não adotantes de sistemas ILP), a escassez de mão de obra (9,3%) e a pequena escala das atividades (9,7%). Um produtor destaca: "*falta maquinário e acho que a tecnologia não é para pequeno produtor. Teria que ter pelo menos 100 alqueires. Margem de lucro da lavoura é pequena e precisa de escala*"; "*minha área é pequena e eu teria que usar parte do pasto para lavoura, eu não teria onde colocar o gado, os equipamentos são caros e exigiria investimento, e a lavoura tem risco climático maior e dá mais trabalho*".

O elevado custo e investimento inicial da tecnologia estavam associados à necessidade de aquisição de máquinas e insumos agrícolas, sendo percebido como uma limitação à adoção por 7,3% dos produtores. O maior risco climático e de mercado associado à produção de grãos foi percebido como uma barreira para a adoção da rotação lavoura-pastagem (6,4%), como ilustra um produtor: "*a lavoura tem risco muito alto, chegou a hora de colher tem que colher, não dá para esperar, já o gado não. Você pode esperar para vender. E o custo de implantação da lavoura é muito alto*". O acesso à informação de qualidade sobre a tecnologia mostrou-se central no processo decisório para a adoção: 9,3% dos produtores mencionaram a falta de conhecimento ou de orientação técnica adequada como uma limitação. Um produtor relatou: "*falta técnico e orientação, sei criar gado e não sei plantar lavoura. Tenho medo. Se falta técnico para orientar só a pecuária, imagina a integração com outras culturas*". Por fim, 8,8% dos pecuaristas mencionaram que tinham foco na pecuária e, em alguns casos, adotavam outras práticas de manu-

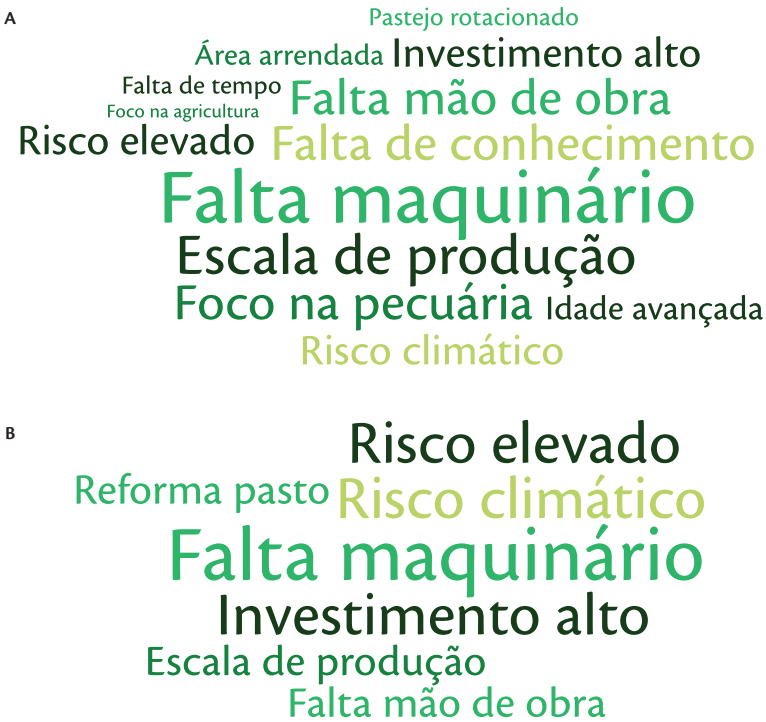


Figura 2.13. Barreiras à adoção percebidas por não adotantes de sistemas integração lavoura-pecuária (ILP) em 2017 (A) e 2024 (B).

tenção e de manejo intensivo de pastagens. Demais tópicos foram menos citados.

A análise das barreiras à adoção do ILP em 2024 mostra que, apesar dos avanços no conhecimento sobre o sistema, persistem entraves estruturais, econômicos e estratégicos do produtor que podem limitar sua expansão. A falta de máquinas agrícolas apropriadas para o plantio e colheita da lavoura e a dificuldade de locação continuam como as principais limitações (12,5%), como comentou um produtor: "*não tenho maquinário para o plantio e colheita, e o aluguel de máquinas não funciona na minha região*". Manteve-se a percepção de elevado investimento inicial (9,4%), de risco climático (9,4%) e risco econômico associado ao componente agrícola (9,4%), especialmente entre produtores com menor escala de produção, como comentou um produtor: "*ouvi falar bem do ILP, mas não realizo por causa do custo da lavoura, principalmente com o resultado da última safra*". Embora menos frequente que em 2017, a limitação de área ainda foi mencionada (6,2%), geralmente associada à dificuldade de diluir custos fixos e viabilizar a rotação lavoura-pasto, bem como a falta de mão de obra para o cultivo agrícola (6,2%). Alguns produtores mencionam que adotam outras práticas de reforma, de manejo e manutenção da pastagem, por isso não adotam a rotação sistemática e estratégica de lavoura-pastagem (6,2%).

A falta de conhecimento acerca do sistema de produção não foi mencionada em 2024, sugerindo que no intervalo entre as pesquisas a difusão do conhecimento sobre o sistema se ampliou, deixando de ser uma limitação, porém a adoção seguiu condicionada por fatores que extrapolavam o conhecimento técnico.

2.5.2 Integração lavoura-pecuária-floresta

A Figura 2.14 apresenta as barreiras à adoção relatadas por produtores não adotantes de sistemas ILPF em 2017.

A principal resistência à adoção de sistemas ILPF estava associada à dificuldade e ao custo elevado da destoca do componente florestal ao final do ciclo, conforme mencionada por 16% dos entrevistados. Adicionalmente, o longo tempo para o retorno financeiro do componente arbóreo (citado por 9,3% dos produtores), associado às incertezas de mercado e de preços futuros (11,8% de citações), foi relatado como limitações para a adoção, conforme declarado por alguns produtores: "*árvore é cultura para longo prazo e não há garantia de que o preço se sustenta no futuro. Hoje pode estar bom, mas daqui a 5 ou 10 anos não se sabe*"; "*tenho dúvidas quanto à viabilidade dessa atividade. É difícil vender eucalipto por aqui*"; "*a árvore daria certo nas curvas de nível, ali tem sombra e não teria que mexer naquele local. Falta informação sobre mercado para o produtor investir. No boi o mercado é certo, no restante você trabalha no escuro, falta segurança*". Essas percepções revelam que, na visão de parte dos produtores, o investimento em árvores pode comprometer a viabilidade econômica do sistema integrado.

Desafios operacionais foram também apontados como fator de resistência. A presença de árvores na área produtiva interfere no manejo agrícola e pecuário, dificultando a mecanização e promovendo sombreamento (citado por 6,7% dos produtores), conforme relatos: "*quem trabalha com ILP não dá certo com floresta. Perde produção da lavoura por causa da sombra das árvores e a destoca é um problema*"; "*a árvore dificulta o manejo da lavoura para passar defensivos agrícolas*". Produtores



Figura 2.14. Barreiras à adoção percebidas por não adotantes de sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em 2017.

com foco maior na agricultura consideraram que o ILPF poderia ser mais vantajoso para pecuaristas, pois o sombreamento das árvores poderia beneficiar o gado.

Além dos aspectos técnicos e econômicos, em 2017 a adoção de sistemas ILPF com eucalipto também esbarrava em percepções culturais e crenças consolidadas: 9,8% dos não adotantes associaram a produção de eucalipto nos sistemas integrados à redução da umidade do solo e à degradação da terra. O acesso à informação qualificada e aprofundada sobre a tecnologia mostrou-se essencial para esclarecer e dar confiança para o tomador de decisão: 8,8% dos produtores alegaram falta de conhecimento ou de orientação técnica especializada como um limitante à adoção. Demais itens foram menos citados.

Essas barreiras mostram que a adoção do ILPF depende não apenas de viabilidade técnica e econômica, mas também de confiança no mercado e suporte institucional, sem os quais o produtor tende a priorizar sistemas com retorno mais rápido e previsível.

Ressalta-se a importância de programas de transferência de tecnologia e de informação precisa para o planejamento, implantação e manejo de sistemas integrados, bem como para a superação de crenças com base em evidências de pesquisa.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo evidenciam o potencial dos sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF) como estratégias para a intensificação sustentável da agropecuária no estado de São Paulo. Ao mesmo tempo, reforçam que a adoção desses sistemas é condicionada por um conjunto de fatores estruturais, econômicos, técnicos e culturais que variam conforme o perfil do produtor e as condições locais de produção.

No caso do ILP, observou-se uma evolução positiva entre 2017 e 2024, com maior consolidação dos arranjos produtivos e valorização de benefícios como a recuperação e manutenção das pastagens, o aumento da eficiência produtiva, a conservação do solo e a diversificação de atividades. Os resultados também indicam que a adoção está associada a propriedades de maior escala, maior acesso ao crédito e crescente uso de tecnologias digitais e de gestão, embora estas ainda não sejam predominantes.

A adoção do componente florestal mostrou-se mais restrita, marcada por menor escala produtiva, dificuldades técnicas e incertezas econômicas. Os produtores associaram o ILPF à melhoria do conforto térmico dos animais, à valorização ambiental da propriedade e ao retorno econômico com a madeira. Entretanto, a baixa atratividade econômica no curto prazo, aliada ao maior custo de implantação e à ausência de mercado estruturado, limitaram sua expansão.

Observou-se a existência de um conjunto de barreiras à adoção, destacando-se a percepção de altos riscos climáticos e operacionais, os custos elevados de implantação, a demora no retorno econômico, além da insuficiência de assistência técnica contínua e do acesso limitado a linhas de crédito. No entanto, a pesquisa reforça que políticas públicas adequadas, como o fortalecimento do crédito rural, especialmente do RenovAgro, e programas de transferência de tecnologia podem ter papel decisivo na superação desses entraves.

A ampliação da adoção dos sistemas integrados depende de estratégias articuladas que combinem informação, apoio técnico especializado e incentivos adaptados às diferentes realidades dos produtores. Mais do que sistemas de produção, a ILP e a ILPF devem ser compreendidas como processos de transformação do território rural, com potencial de promover ganhos econômicos, sociais e ambientais de forma integrada e sustentável.

Por fim, os autores agradecem a contribuição acadêmica e intelectual dos técnicos colaboradores Alexandre Aparecido Casaca (CATI); Alfredo Ferrari Souza (CATI), Braz (CATI), Caio (Coopercitrus), Carlos Henrique de Paula e Silva (CATI), Felipe (Coopercitrus), Humberto Evangelista Pires (CATI), Idoraldo Dassi Gonçales Júnior (CATI), João Paulo Agapto (UFSCar, campus Buri), João Taane Kauche Andraus (CATI), Jorge Soares Justo (CATI), Luiz Gustavo (Cocamar), Rafael (Coopercitrus), Rosania Glaudia Guerra (CATI), Sérgio Luis Villas Boas Tambara (CATI), Silter Aparecido de Oliveira Fadel (CATI), Vanderlei Aparecido Rocha (CATI) e Wellington da Silva Toledo (UFSCar, Campus Buri), no levantamento de dados que geraram este capítulo.

2.7 REFERÊNCIAS

BERNARDON, A.; SIMIONI ASSMANN, T.; BRUGNARA SOARES, A.; FRANZLUEBBERS, A.; MACCARI, M.; DE BORTOLLI, M. A. Carryover of N-fertilization from corn to pasture in an

integrated crop-livestock system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 5, p. 687-702, 2021. DOI: http://doi.org/10.1080/03650340.2020.1749268.

CARAUTA, M.; TROOST, C.; GUZMAN-BUSTAMANTE, I.; HAMPF, A.; LIBERA, A.; MEURER, K.; BÖNECKE, E.; FRANKO, U.; RIBEIRO RODRIGUES, R. A.; BERGER, T. Climate-related land use policies in Brazil: How much has been achieved with economic incentives in agriculture? **Land Use Policy**, v. 109, p. 105618, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105618.

CARRER, M. J.; MAIA, A. G.; VINHOLIS, M. M. B; DE SOUZA FILHO, H. M. Assessing the effectiveness of rural credit policy on the adoption of integrated crop-livestock systems in Brazil. **Land Use Policy**, v. 92, p. 104468, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104468.

GARRETT, R. D.; NILES, M. T.; GIL, J. D. B.; GAUDIN, A.; CHAPLIN-KRAMER, R.; ASSMANN, A.; ASSMANN, T.S .; BREWER, K.; CARVALHO, P. C. F.; CORTNER, O.; DYNES, R.; GARBACH, K.; KEBREAB, E.; MUELLER, N.; PETERSON, C.; REIS, J. C.; SNOW, V.; VALENTIM, J. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 136-146, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.003.

GEROSKI, P. A. Models of technology diffusion. **Research Policy**, v. 29, n. 4-5, p. 603-625, 2000. DOI: http://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00092-X.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção Agrícola Municipal (PAM), 2025. Disponível em: https://basedosdados.org/dataset/fc403b40-a7e1-40e7-9efe-910847b45a69?table=bd9b2960-361f-4465-be23-baaadaaf266d. Acesso em: 4 ago. 2025.

MOZZER, G. B. Agriculture and cattle raising in the context of a low carbon economy. In: MOTTA, R.; HARGRAVE, J.; LUEDEMANN, G.; GUTIERREZ, M. (eds.). Climate change in Brazil: economic, social and regulatory aspects. Brasilia: IPEA, 2011. p. 107-122.

NIE, Z.; MCLEAN, T.; CLOUGH, A.; TOCKER, J.; CHRISTY, B.; HARRIS, R.; RIFFKIN, P.; CLARK, S.; MCCASKILL, M.. Benefits, challenges and opportunities of integrated crop-livestock systems and their potential application in the high rainfall zone of southern Australia: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 235, p. 17-31, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.002.

OLIVEIRA, J. M.; GOLLANY, H. T.; POLUMSKY, R. W.; MADARI, B. E.; LEITE, L. F. C.; MACHADO, P. L. O. A.; CARVALHO, M. T. M. Predicting soil organic carbon dynamics of integrated crop-livestock system in Brazil using the CQESTR model. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 826786, 2022. DOI: http://doi.org/10.3389/fenvs.2022.826786.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; DE ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; DE OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2013-2025, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-024-01038-y.

SOUZA FILHO, H. M.; BUAINAIN, A. M.; SILVEIRA, J. M. F. J.; VINHOLIS, M. M. B. Condicionantes da adoção de inovações tecnológicas na agricultura. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 28, n. 1, p. 223-255, 2011.

SOUZA FILHO, H. M.; VINHOLIS, M. M. B.; CARRER, M. J.; BERNARDO, R. Determinants of adoption of integrated systems by cattle farmers in the State of Sao Paulo, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 1, p. 103-117, 2021. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-020-00565-8.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M. S.; CARRE, M. J.; BARIONI JUNIOR, W.; BERNARDO, R.; CASACA, A. A.; ROJAS, D. C.; TOKUDA, F. S.; PELINSON, G. J. B.; SANTOS JUNIOR, A. dos; GONÇALES JÚNIOR, I. D.; ANDRAUS, J. T. K.; JUSTO, J. S.; MARTINES, L.; GUERREIRO, M. F.; FADEL, S. A. de O.; BORGES, W. L. B. **Adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em São Paulo**. Brasília: Embrapa, 2020a. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento da Embrapa, 47).

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; SHIMATA, I.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Economic viability of a crop-livestock integration system. **Ciência Rural**, v. 51, n. 2, p. e20190538, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190538.

VINHOLIS, M. M. B.; VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; CARRER, M. J.; BARIONI JUNIOR, W.; BERNARDO, R. Perfil dos adotantes de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta do Centro-Oeste do estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v. 51, p. eie102020, 2021a.

VINHOLIS, M. M. B.; CARRER, M. J.; SOUZA FILHO, H. M.; BERNARDO, R. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no estado de São Paulo: estudo multicasos com adotantes pioneiros. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 1, p. e234057, 2021b. DOI: http://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.234057.

VINHOLIS, M. M. B.; SAES, M. S. S.; CARRER, M. J.; SOUZA FILHO, H. M. The effect of meso-institutions on adoption of sustainable agricultural technology: a case study of the Brazilian Low Carbon Agriculture Plan. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124334, 2021c. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124334.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; CARRER, M. J. Preditores da adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária em São Paulo e o papel dos intermediários da inovação. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 3, p. e252894, 2022. DOI: http://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.252894.

Capítulo 3

Sistemas Integrados de Longa Duração da Embrapa Pecuária Sudeste

José Ricardo Macedo Pezzopane, Alexandre Rossetto Garcia, Luiz Adriano Maia Cordeiro, Patrícia Perondi Anchão Oliveira, Sérgio Novita Esteves, André Luiz Monteiro Novo, Teresa Cristina Alves, Alberto Carlos de Campos Bernardi



RESUMO: A Embrapa Pecuária Sudeste vem estudando a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) desde 2005. São quatro sistemas integrados de longa duração conduzidos na área experimental, em que são detalhadas as atividades desenvolvidas desde a implementação até o presente momento. O primeiro sistema refere-se a uma área de integração lavoura-pecuária voltada à produção de bovinos de corte (ILP-Corte), implantada em 2005 em uma área destinada à renovação de pastagens. O segundo sistema compreende duas áreas arborizadas com espécies nativas da Mata Atlântica, implantadas em 2007 em arranjos silvipastoril e silviagrícola (SSP-Nativas), estabelecendo um modelo de produção com ênfase na preservação da biodiversidade e na diversificação produtiva. O terceiro sistema baseia-se na implantação, em 2011, de um projeto de pesquisa que estabeleceu cinco diferentes arranjos produtivos na mesma área do sistema ILP-Corte, com o objetivo de avaliar diferentes níveis de intensificação da pecuária em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF-Corte). Por fim, o quarto sistema se refere à Unidade de Referência Tecnológica (URT) para produção de leite com baixa emissão de carbono (ILPF-Leite), implementada em 2017, voltada à adoção de práticas sustentáveis e intensificação produtiva em sistemas leiteiros. Nos capítulos seguintes, serão apresentados os resultados obtidos e as tecnologias desenvolvidas ao longo de aproximadamente duas décadas de pesquisa, a partir da implantação dos sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste.
Palavras-chave: Agrossilvipastoril; Silvipastoril, Experimentação de Longa Duração; Manejo; Eucalipto; Árvores Nativas.

ABSTRACT: Embrapa Pecuária Sudeste has been pioneering research on Integrated Crop-Livestock-Forestry Systems (ICLFS) since 2005. Currently, four distinct, long-term integrated systems are being conducted within the experimental area, and their implementation and subsequent development activities are detailed herein. The first

https://doi.org/10.4322/9786586819427-3

system, an Integrated Crop-Livestock (ICL) area focused on beef cattle production (ICL-Beef), was established in 2005 within a designated pasture-renovation area. The second system comprises two wooded areas featuring native Atlantic Forest species, implemented in 2007. These areas are structured into silvopastoral and silvoagricultural arrangements (SPS-Natives), thereby establishing a production model that emphasizes biodiversity conservation and productive diversification. The third system originated from a 2011 research project that established five distinct production arrangements within the same area as the original ICL-Beef system. This project aimed to evaluate different levels of livestock intensification within ICLFS. Finally, the fourth system is the Technological Reference Unit (TRU) for low-carbon milk production (ICLFS-Dairy), implemented in 2017. This unit focuses on the adoption of sustainable practices and productive intensification in dairy farming systems. The forthcoming chapters will present the accumulated results and technologies developed over approximately two decades of research, stemming from the implementation and continuous monitoring of these integrated systems at Embrapa Pecuária Sudeste.
Keywords: Agrosilvopastoral; Silvopastoral; Long-Term Experimentation; Management; Eucalyptus; Native Trees.

3.1 INTRODUÇÃO

A Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos, estado de São Paulo, tem como missão disponibilizar soluções sustentáveis de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para a agropecuária brasileira, com foco no benefício direto à sociedade. A atuação da Unidade concentra-se na intensificação sustentável dos sistemas de produção de carne e leite.

As atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D), bem como as ações de transferência de tecnologia (TT) na temática dos sistemas integrados, tiveram início na safra 2005/2006, com a renovação de pastagens por meio da implantação de sistemas consorciados de pastagens com culturas anuais, caracterizando o sistema denominado integração lavoura-pecuária-corte (ILP-Corte). A partir de 2007, tiveram início os experimentos com inclusão do componente arbóreo, com a implementação de sistemas silvipastoril e silviagrícola, utilizando espécies arbóreas nativas (SSP-Nativas).

Em 2010, com o lançamento do projeto da Rede PECUS ("Dinâmica dos Gases de Efeito Estufa em Sistemas Pecuários"), foi proposta uma reconfiguração do sistema ILP-Corte, com a adoção de novos arranjos produtivos integrando o componente arbóreo. Essa remodelação resultou na ampliação da área experimental para atender às demandas da referida Rede de Pesquisa, originando o sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte).

Posteriormente, em 2017, em parceria com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), foi instalada uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) voltada à produção leiteira com baixa emissão de carbono, composta por diferentes modalidades de sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris (ILPF-Leite).

Desde a implantação da primeira área experimental com sistemas integrados, em 2005, as equipes de pesquisa e transferência de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste vêm conduzindo diversos projetos em parceria com agências públicas de fomento e empresas privadas. Esses esforços contribuíram significativamente para a consolidação da Unidade como referência nacional no tema de sistemas integrados no âmbito da Embrapa.

Os dados coletados ao longo de duas décadas das pastagens, culturas anuais, árvores, animais, atributos do solo e do clima formam uma base de dados rica e confiável sobre sistemas integrados nos biomas da Mata Atlântica e Cerrado. As interações entre os componentes produtivos são complexas e podem ser mais completamente compreendidas nesse tipo de estudo de longa duração.

Os experimentos de longo prazo são aqueles conduzidos a campo por mais de vinte anos que fornecem recursos para avaliar as dimensões da sustentabilidade agrícola, prever mudanças globais futuras e validar modelos de predição (Rasmussen et al., 1998). Devido à sua longevidade, a manutenção é dispendiosa, sendo necessários sucessivos projetos para aporte de recursos, como será indicado na descrição de cada sistema a seguir. No entanto, seu valor científico e prático é imensurável, e continua aumentando com o tempo de implantação. Debreczeni e Körschens (2003) apresentaram a relação dos experimentos mais antigos do mundo (vários são centenários) e confirmam

que as informações sobre o uso da terra não podem ser substituídas por outro tipo de estudo, pois estes experimentos, além de fornecer resultados característicos locais, também indicam relações de causa e efeito universalmente válidas e reais.

As informações geradas com ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste têm contribuído para ampliar o conhecimento tanto sobre aspectos produtivos e ambientais, quanto da viabilidade econômica desses sistemas integrados. A longevidade desses experimentos tem permitido identificar e desenvolver soluções para desafios atuais da agricultura, como a garantia da segurança alimentar e mitigação e adaptação às mudanças climáticas, além de colaborar com a adoção dos sistemas pelos produtores rurais e técnicos.

A localização da Embrapa Pecuária Sudeste, destacando as áreas experimentais e as Unidades de Referência Tecnológica, onde estão os sistemas integrados são apresentadas na Figura 3.1. As áreas totalizam 78 hectares distribuídos entre diferentes modalidades de integração, detalhadas nos tópicos subsequentes deste capítulo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE

3.2.1 Caracterização do meio físico: clima, solo e vegetação

A área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste (Fazenda Canchim) está inserida na Microbacia Hidrográfica (MBH) do Ribeirão Canchim (Primavesi et al., 1999). O relevo apresenta-se plano a moderadamente ondulado, sendo a declividade média da MBH de 3,64% (Calderano Filho et al., 1998; Primavesi et al., 1999).

O clima da região é classificado como CWa, tropical de altitude (Rolim et al., 2007; Alvares et al., 2013), de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. O clima local é classificado como subtropical de altitude (Köppen: Cwa), com duas estações bem definidas: uma estação chuvosa de outubro a março, com temperatura média de 23,2 °C e precipitação de 1.140 mm, e uma estação seca de abril a setembro, com temperatura média de 19,9 °C e precipitação de 266 mm, considerando o período médio entre 1992 e 2024.



Figura 3.1. Localização relativa (A), perímetro da Fazenda Canchim (B) e detalhes das areas experimentais com sistemas integrados (C) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

A Figura 3.2, elaborada a partir do levantamento realizado por Calderano Filho et al. (1998) na escala 1:10.000, ilustra os solos das áreas com os sistemas integrados. Há um predomínio do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, A moderado, textura argilosa (310 g kg^{-1} argila, e 56 mmo_c dm^{-3} CTC na camada de 0-0,2m) no ILPF-Corte, ILPF-Leite e parte do SSP-Nativas, que também apresenta uma área de Latossolo Vermelho Distrófico, A moderado, textura argilosa (330 g kg^{-1} argila, e 73 mmo_c dm^{-3} CTC na camada de 0-0,2m) e outra de Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, textura argilosa (493 g kg^{-1} argila, e 119 mmo_c dm^{-3} CTC na camada de 0-0,2m).

A Embrapa Pecuária Sudeste está em área de tensão ecológica, onde se encontram dois biomas, Cerrado e Mata Atlântica, esta representada por Floresta Estacional Semidecídua (Primavesi et al., 1999; Cardoso et al., 2020). Silva e Soares (2003) realizaram levantamento florístico na floresta dessa área e encontraram 146 espécies botânicas, de 44 famílias e 96 gêneros. O índice de diversidade de Shannon-Wiener de 3,45, que indica a diversidade em uma comunidade (considerando a riqueza de espécies e a uniformidade de suas abundâncias), foi semelhante a outros obtidos em florestas estacionais semidecíduas no estado de São Paulo. O levantamento das espécies arbóreas nativas ocorrentes na região do bioma Cerrado (Primavesi et al., 1999) detectou: i) cerradão, 111 espécies reunidas em 20 famílias, e ii) cerrado, 55 espécies reunidas em 29 famílias; e com predominância das Leguminosae, Annonaceae, Melastomaceae e Lauraceae.

3.2.2 Sistema de integração lavoura-pecuária-corte (ILP-Corte)

A primeira área com trabalhos em integração lavoura-pecuária da Embrapa Pecuária Sudeste foi implantada na safra de 2005/06, em uma ação relacionada ao projeto PROTILP (Programa de Transferência de Tecnologia de Integração Lavoura-Pecuária), caracterizada como implantação de uma unidade de referência tecnológica (URT) para renovação de pastagem por meio de consórcio e terminação de bovinos de corte em sistema de integração lavoura-pecuária, de acordo com a Figura 3.3 (Bernardi et al., 2009). Os objetivos

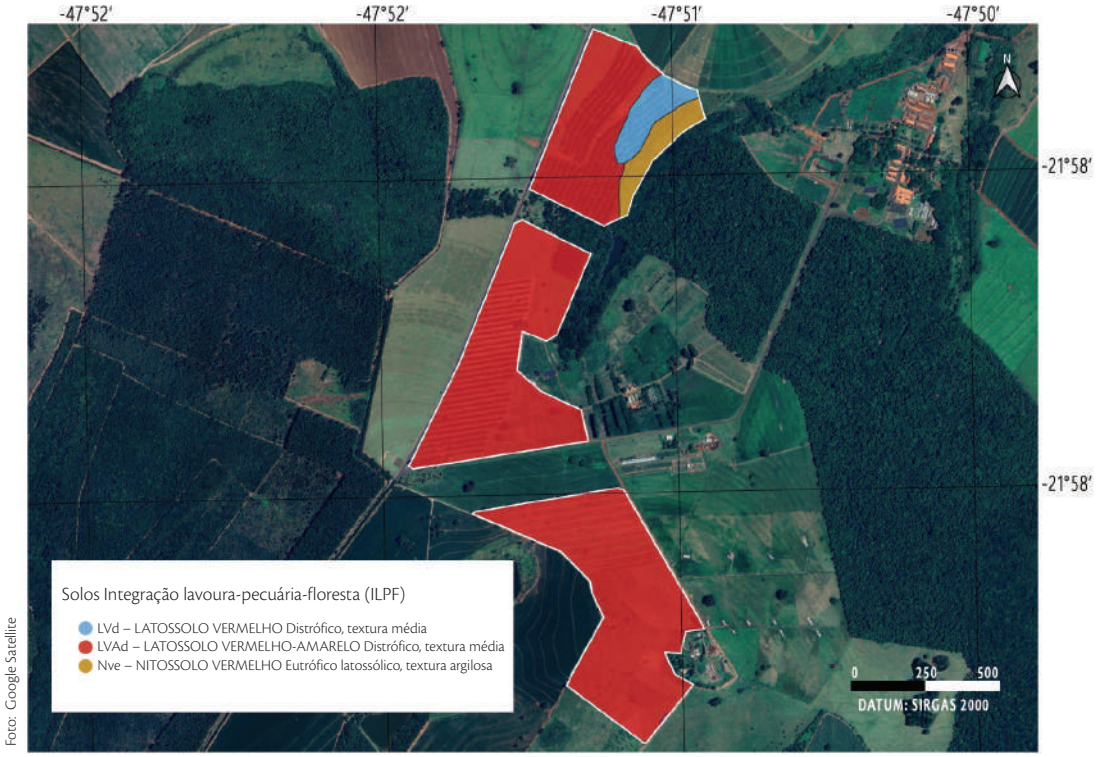


Figura 3.2. Mapa de tipos de solos dos sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.
Fonte: Calderano Filho et al. (1998).



Figura 3.3. Localização da área de implementação do sistema de integração lavoura-pecuária-corte (ILP-Corte) na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.
Fonte: Bernardi et al. (2009).

da implantação da URT eram divulgar e difundir os conceitos e práticas da ILP, promover eventos, cursos e materiais informativos para produtores e técnicos, adaptar tecnologias ILP às diferentes realidades regionais e treinar técnicos para atuar como multiplicadores da tecnologia.

Entre os anos de 2005 e 2008, em uma área de 21 hectares, ocupada com a pastagem de capim braquiária (*Urochloa decumbens* Stapf), foi realizado o estudo em três safras consecutivas (2005/06, 2007/08 e 2008/09). Em cada safra, 1/3 da área foi renovada para os capins-marandu (*Urochloa brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf BRS Marandu) e Piatã (*Urochloa brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf BRS Piatã), em consórcio o cultivo de milho (*Zea mays* L.) var. BRS 2020 (híbrido duplo) na primeira safra, e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) var. BRS 610 (híbrido) nas safras subsequentes, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.4.

As culturas do milho e do sorgo foram semeadas em novembro/dezembro. No primeiro ano, na época da adubação de cobertura do milho (60 dias após a germinação) foi realizada a semeadura do capim-marandu (Figura 3.5A). Nos dois anos seguintes, o plantio do sorgo e da forrageira de capim-piatã ocorreu concomitantemente, fazendo o plantio da forrageira na entrelinha do sorgo, em outra operação e sem adubação de plantio.

Após o desenvolvimento do consórcio (Figura 3.5B) e colheita da silagem (Figura 3.5C), o pasto se desenvolveu por 60 dias (Figura 3.5D) até o início do pastejo. Os bovinos utilizados durante o período experimental foram na safra 2005/06: Nelore, cruzados Nelore x Europeu e Canchim (5/8 Charolês + 3/8 Zebu); e na safra 2006/07 e 2007/08: Canchim. Os detalhes das raças e categorias estão descritos em Esteves et al. (2010) (Figura 3.5E). A lotação animal do sistema ILP-Corte era ajustada conforme a oferta de forragem do pasto degradado ou do pasto reformado, tanto no período de verão quanto no período seco. Os animais foram confinados (primeira safra), e semi-confinados (segunda e terceira safras), sendo os cochos para alimentação colocados na própria área de pastagem (Figura 3.5F).

3.2.3 Sistemas agrossilvipastoris com árvores nativas (SSP-Nativas)

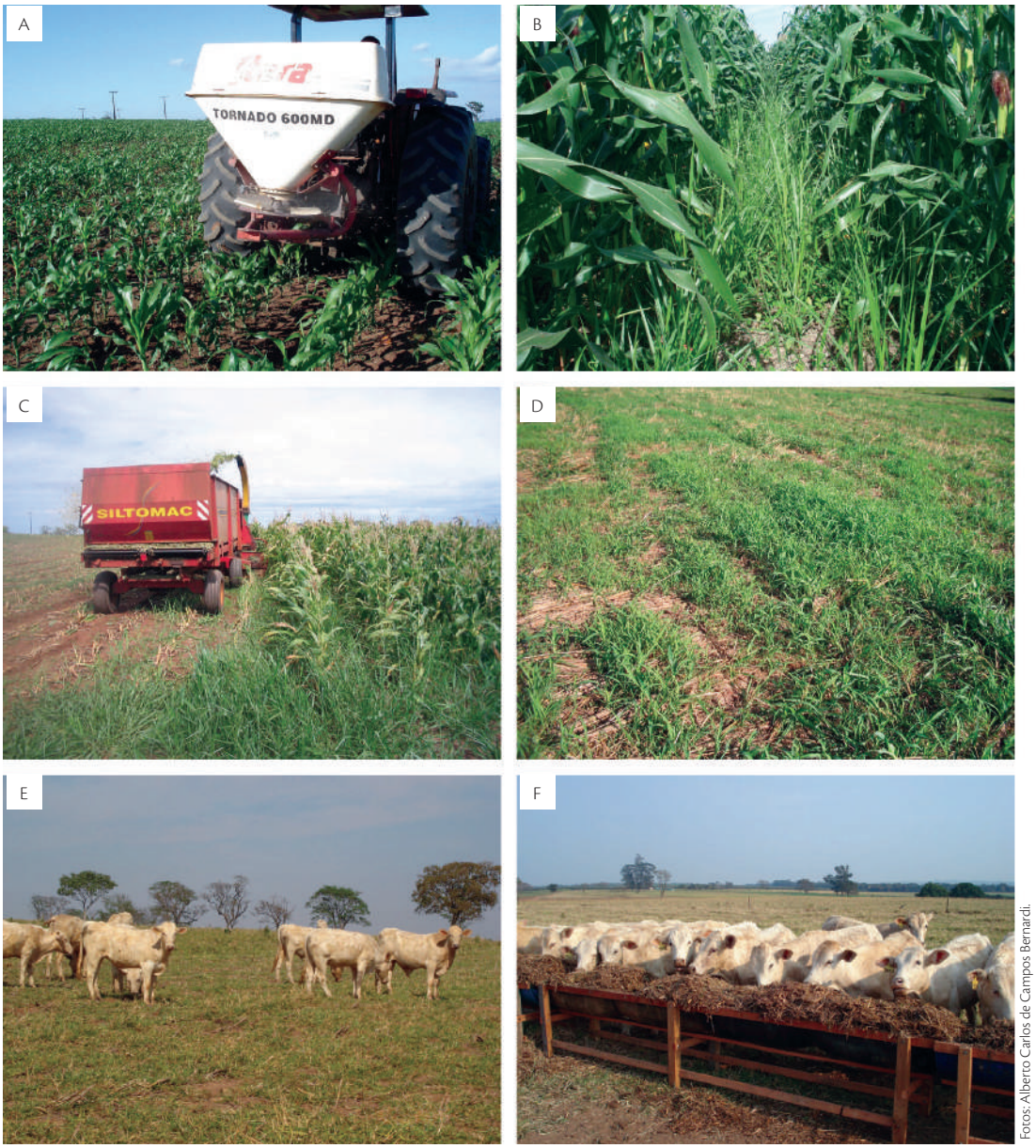
Diante do crescente interesse no uso de sistemas silvipastoris no Brasil, na década de 2000, e poucas experiências com essa modalidade de produção no estado de São Paulo, a Embrapa Pecuária Sudeste implantou dois sistemas de produção pecuária com a presença do componente arbóreo. A opção por espécies nativas da região se deu em função da carência de estudos com essas combinações, e o grande potencial de espécies adequadas para produção de madeira para serraria e laminação frente às espécies exóticas como o eucalipto, por exemplo.

Um dos fatores decisivos na implantação de sistemas silvipastoris é a escolha de espécies adaptadas às características da região, e outra característica nesses sistemas é o plantio combinado de espécies nativas. Essa estratégia visa reduzir riscos de pragas e doenças, obter efeitos complementares pela diversidade (oferta de abrigo, alimento e outros recursos para fauna e aporte de nitrogênio, por exemplo), bem como permitir maior flexibilidade na seleção de plantas ao longo da condução do sistema para desbaste e/ou para geração de renda.

Para a seleção das espécies a serem implementadas na área experimental, foi estabelecida uma parceira entre pesquisadores da Embrapa Pecuária Sudeste e da Embrapa Florestas, e os critérios estabelecidos para a escolha das espécies foram: a) adaptação às condições locais; b) desenvolvimento rápido; c) capacidade de fixar nitrogênio; d) produção de madeira; e e) provisão de recursos para a fauna. Cada espécie florestal escolhida para compor o sistema não necessariamente apresentava individualmente todas essas características, mas pelo menos uma delas. A partir do levantamento da composição da vegetação do entorno da área experimental, realizado por Silva e Soares

Ano 0	Pasto degradado	Pasto degradado	Pasto degradado
Ano 1	Milho silagem + forrageira	Pasto degradado	Pasto degradado
Ano 2	Pasto	Sorgo silagem + forrageira	Pasto degradado
Ano 3	Pasto	Pasto	Sorgo silagem + forrageira

Figura 3.4. Esquema de rotação de culturas e forrageiras no sistema de integração lavoura-pecuária-corte (ILP-Corte) utilizado na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, em área de 21 ha.
Fonte: Adaptado de Bernardi et al. (2009).



Fotos: Alberto Carlos de Campos Bernardi.

Figura 3.5. Fotos sobre integração lavoura-pecuária-corte (ILP-Corte) no período entre 2005 e 2008: plantio de forrageira na adubação de cobertura (A); consórcio milho e capim-piatã (B); colheita (C); pastagem após colheita (D); pastejo no período seco (E); e semi-confinamento (F).

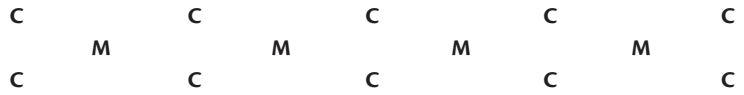


Figura 3.6. Disposição dos renques de árvores no SSP-Nativas com as espécies "madeireiras" (M) na linha central e espécies "condutoras" (C) nas linhas laterais.

(2003), foram selecionadas as espécies (Nicodemo et al., 2016b) angico-branco (*Anadenanthera colubrina*); canafístula (*Peltophorum dubium*); ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*); jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis*) e pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*), referidas como "madeireiras" (M) para compor a linha de árvores do sistema silvipastoril. Para tutoramento dessas espécies e para disponibilizar recursos para a fauna, foram escolhidas as espécies de mutambo (*Guazuma ulmifolia*) e de capixingui (*Croton florisbundum*) para compor as linhas laterais, referidas como condutoras (C), de acordo com a Figura 3.6.

O espaçamento de implementação do sistema foi de 2,5 metros entre as linhas do renque e 2,5 metros entre as árvores na linha, com distância de 17 metros entre os renques, que possuem a orientação predominante Sudoeste-Nordeste (Figura 3.7), resultando em cerca de 545 árvores por hectare. O espaçamento foi escolhido baseado em dados de plantios puros (Carvalho et al., 1999) e em Dias-Filho (2006), e o plantio ocorreu entre os meses de dezembro de 2007 e janeiro de 2008.

A estratégia de implantação ocorreu em duas áreas de aproximadamente seis hectares cada (Figura 3.7). Na primeira delas, as árvores foram plantadas diretamente na pastagem de *Urochloa decumbens*, com proteção de cerca (sistema silvipastoril) utilizadas com pastejo de bovinos de corte desde então (Figura 3.8). Na segunda área, o plantio das árvores foi intercalado com culturas agrícolas (sistema silviagrícola), de espécies forrageiras anuais, como o milho e o sorgo, até que as árvores atingissem porte compatível com a presença do gado (Figura 3.9).

Durante a condução dos projetos na área do SSP-Nativas foram realizados manejos de desbaste ao longo de seu processo produtivo. Esse manejo teve como objetivo aumentar a transmissão da radiação solar frente à competição por luz nos sistemas (Nicodemo et al., 2016a, Pezzopane et al., 2016).

Na área do sistema silviagrícola, em 2012 foi realizado o desbaste de forma sistemática de 33% e 50% das árvores das linhas laterais dos renques, divididos em quatro áreas do sistema, resultando em populações de 422 e 362 árv ha^{-1}, respectivamente (Figura 3.10B). No ano de 2016, nas duas áreas centrais do sistema foi realizado o desbaste de 100% das arvores das linhas laterais, o que resultou na densidade de cerca de 180 árvores ha^{-1} (Figura 3.10C). No ano de 2022, todo o sistema teve desbaste das linhas laterais, condição atual do sistema, com cerca de 180 árvores ha^{-1} (Figura 3.10D).

No sistema silvipastoril em 2016 e 2022, foram realizados os desbastes de 50% e 100% das árvores das linhas laterais dos renques do sistema, com densidade de árvores passando para 362 e 180 árvores por hectare, respectivamente.

3.2.4 Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com Eucalipto (ILPF-Corte)

No ano de 2010, a Embrapa implementou a rede de Pesquisa Pecus (Pecuária Sustentável) com proposta de sistemas de produção pecuária com foco na mitigação de gases de efeito estufa (Zimmer et al., 2019). Nesse sentido, a equipe de pesquisa da Embrapa Pecuária Sudeste implantou o experimento de integração lavoura-pecuária-floresta para a produção de gado de corte, onde foram introduzidos cinco sistemas de produção com diferentes níveis de intensificação.

O experimento foi implementado em 2011, em complementação à área do experimento ILP-Corte (item 2.1). A área experimental contém 30 hectares com cinco sistemas de produção com repetição de área (três hectares cada), descrito a seguir (Figura 3.11):

1) Sistema extensivo (EXT), com pastagem de capim braquiária (*Urochloa decumbens* cv. Basilik), com pastejo em lotação contínua implementada na década de 1990 e sem aporte de calagem e nutrientes.
2) Sistema intensivo (INT), com pastagem solteira de capim-piatã (*Urochloa brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf BRS Piatã) manejada em pastejo de lotação rotacionada com calagem e adubação, com metas de ocupação entre quatro e cinco unidades animal (U.A.) por hectare.

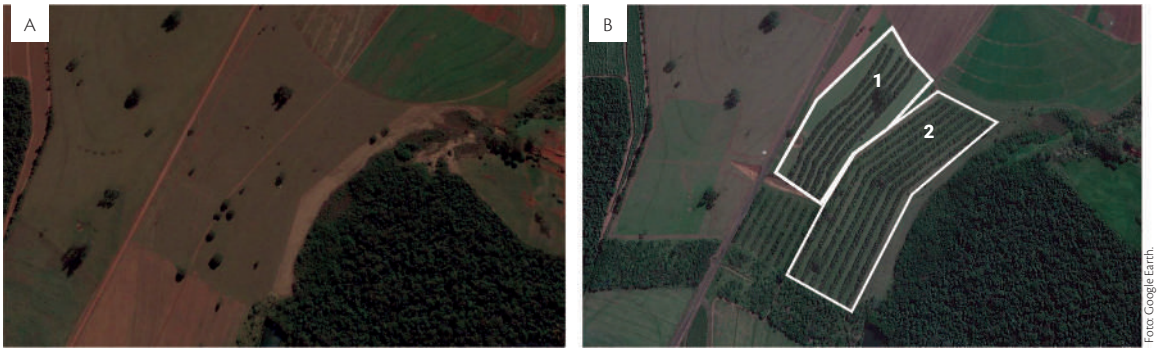
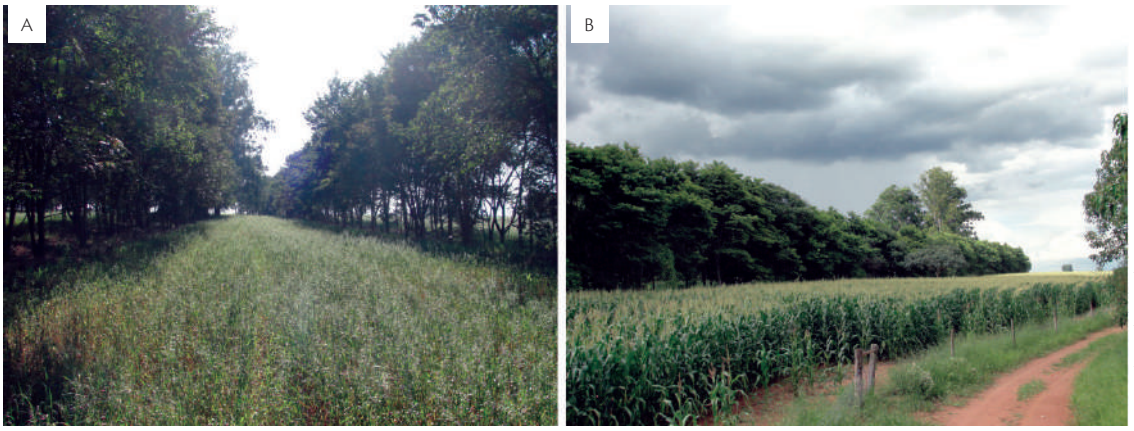


Figura 3.7. Detalhe da área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste anteriormente à instalação do experimento (A) e após a implantação dos sistemas silviagrícola (B-1) e silvipastoril (SSP) (B-2), em São Carlos-SP.



Figura 3.8. Imagens de pastejo de animais no sistema silvipastoril (SSP) com árvores nativas em São Carlos-SP (A-D).

3) Integração lavoura-pecuária (ILP), com pastagem intensiva de capim-piatã, manejada em pastejo de lotação rotacionada, com renovação de 1/3 da área por ano, em consórcio com a cultura de milho.
4) Integração pecuária-floresta (IPF), pastagem de capim-piatã com manejo semelhante ao sistema INT, arborizada com Eucalipto urograndis (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake), clone GG100 plantado em abril de 2011, em fileiras simples no espaçamento de 15 metros entre linhas e 2 metros entre árvores (15x2), com densidade de plantio de 333 árvores por hectare.



Fotos: José Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 3.9. Imagens do cultivo de aveia e milho no sistema silviagrícola com árvores nativas na safra 2013/2014 (A) e safra 2014/2015 (B), em São Carlos-SP.

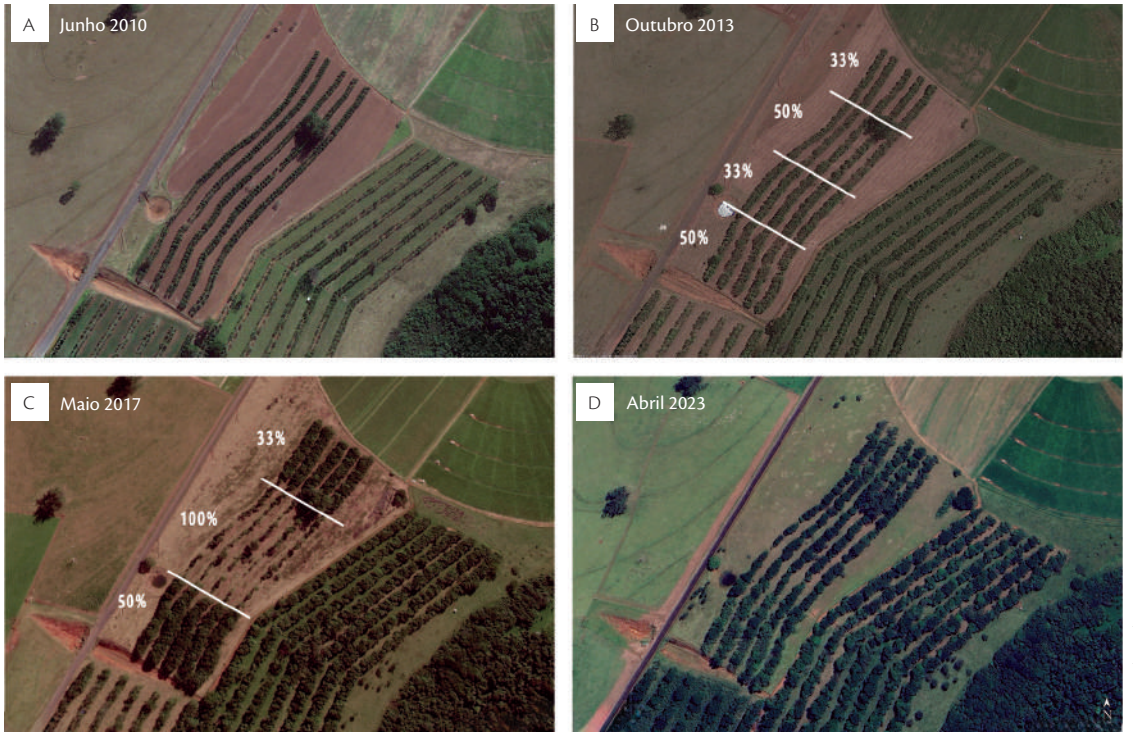


Foto: Google Earth.

Figura 3.10. Evolução do manejo do desbaste no sistema silviagrícola na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP. População original de árvores (A); desbaste de 33 e 50% das árvores das linhas laterais (B); desbaste de 100% das linhas laterais em parte da área (C); e desbaste de 100% das linhas laterais em toda a área (D).

5) Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pastagem de capim-piatã com manejo e renovação semelhante ao sistema ILP, arborizada com Eucalipto urograndis (clone GG100) plantado em abril de 2011, em fileiras simples no espaçamento de 15 metros entre linhas e 2 metros entre árvores (15x2), com densidade de plantio de 333 árvores por hectare.

Nos sistemas IPF e ILPF, o plantio de eucalipto foi realizado em abril de 2011, com orientação de linhas Leste-Oeste, após a dessecação do capim e abertura de

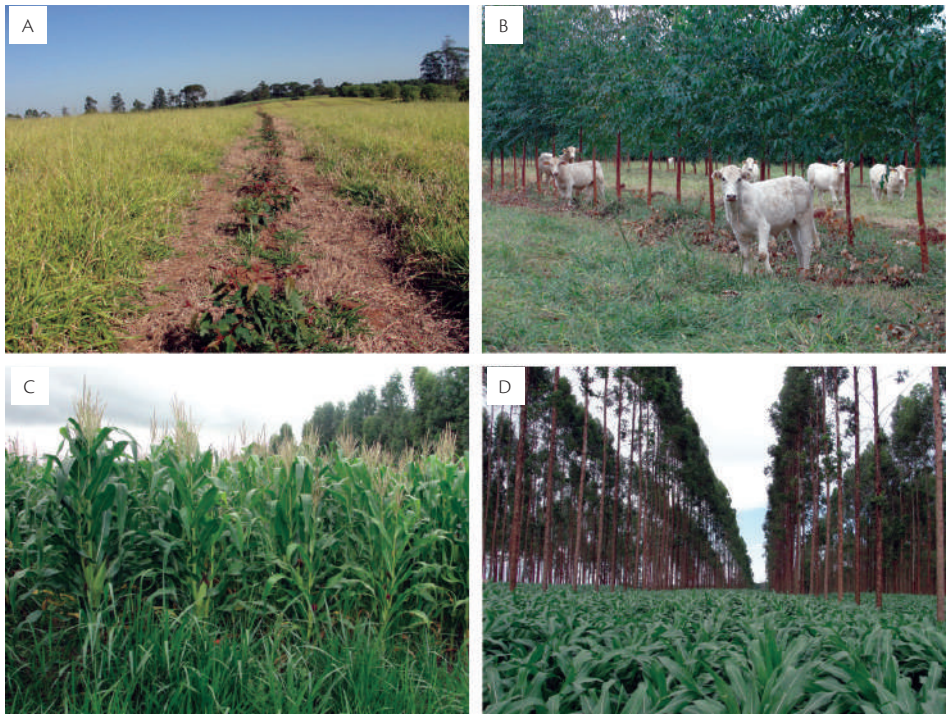


Figura 3.11. Sistemas de produção pecuária floresta para a produção de gado de corte (ILPF-Corte) na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP. Sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (1-2); sistema integração pecuária-floresta (IPF) (3-4); sistema integração lavoura-pecuária (ILP) (5-6); sistema extensivo (EXT) (7-8); sistema intensivo (INT) (9-10).

sulco na linha de plantio (Figura 3.12A), com início do pastejo com bezerros desmamados, em maio de 2012, após 13 meses do plantio (Figura 3.12B). Durante os anos iniciais de implantação do sistema (até a safra 2017/2018) nos sistemas ILP (Figura 3.12C) e ILPF (Figura 3.12B) ocorreu a renovação da pastagem nos sistemas em 1/3 da área a cada safra, com plantio de milho consorciado com o capim braquiária (Pezzopane et al., 2020a, 2020b), conforme croqui esquemático apresentado na Figura 3.13.

Desde o início das atividades experimentais na área no ano de 2013, o sistema foi conduzido com lotes de recria de machos bovinos da raça Canchim (Meo-Filho et al., 2022), lotes de recria de fêmeas da raça Canchim, lotes de cria da raça Canchim (Lemes et al., 2021), lotes de recria e terminação das raças Canchim e Nelore (Brunetti et al., 2025a), lotes de touros jovens das raças Nelore e Canchim (Brunetti et al., 2025b) (Figura 3.14).

Durante a condução dos projetos na área do experimento ILPF-Corte foram realizados dois manejos de desbaste das árvores nos sistemas IPF e ILPF. O primeiro

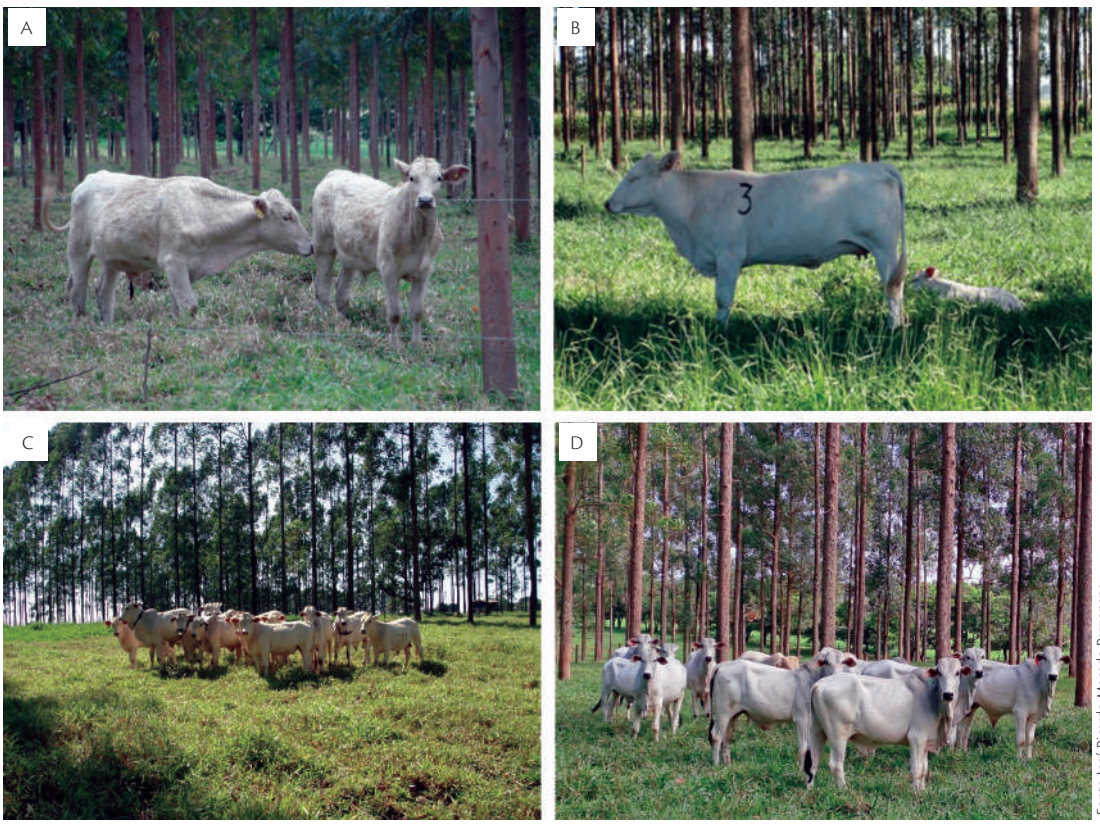


Fotos: José Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 3.12. Desenvolvimento inicial das árvores de eucalipto (A), primeiro lote de pastejo aos 13 meses após o plantio das árvores no experimento (B), desenvolvimento do consórcio milho-braquiária nos sistemas integração lavoura-pecuária (ILP) (C) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (D) no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

...	Pastagem	Pastagem	Pastagem
Ano 1	Pastagem + Eucalipto	Pastagem + Eucalipto	Pastagem + Eucalipto
Ano 2	Milho + Pastagem + Eucalipto	Pastagem + Eucalipto	Pastagem + Eucalipto
Ano 3	Pastagem + Eucalipto	Milho + Pastagem + Eucalipto	Pastagem + Eucalipto
Ano 4	Pastagem + Eucalipto	Pastagem + Eucalipto	Milho + Pastagem + Eucalipto

Figura 3.13. Esquema de rotação de culturas e forrageiras no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) utilizado na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP.



Fonte: José Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 3.14. Imagens de pastejo de animais no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) em São Carlos-SP (A-D).

ocorreu em 2016 (ano 5), com desbaste sistemático de 50% de árvores na linha de plantio, passando para o novo espaçamento de árvores de 15 x 4m, numa densidade de plantio de 166 árvores ha^{-1}. O segundo desbaste ocorreu em 2019 (ano 8), com desbaste de uma linha de árvores, passando para o novo espaçamento de árvores de 30 x 4m, com densidade de 83 árvores ha^{-1} que permaneceu até a colheita total das árvores, que ocorreu em 2024 (ano 13). Esse manejo caracterizou três fases experimentais. A primeira fase (Fase 1) compreendeu desde o plantio até o primeiro desbaste (período de 2011 a 2016); a segunda fase (Fase 2) compreendeu o período entre o primeiro e segundo desbaste (período de 2016 a 2019); e a terceira fase (Fase 3) entre o segundo desbaste e a colheita (período de 2019 a 2024) (Figura 3.15). Essa termi-

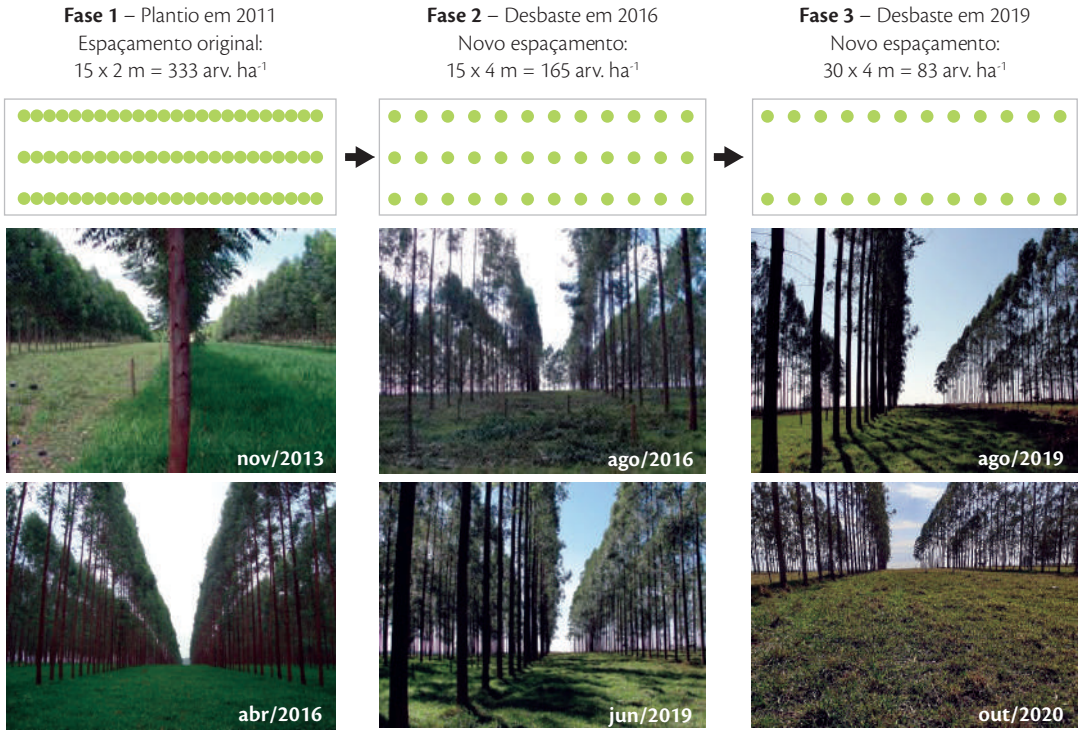


Figura 3.15. Croqui esquemático e imagens da evolução do experimento de integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) a partir das fases do sistema em função do manejo de desbaste do componente arbóreo.

nologia das fases será motivo de diversos estudos realizados sobre os efeitos do desbaste na capacidade produtiva (vegetal e animal) dos sistemas, e será abordada nos capítulos subsequentes.

Desde a sua implementação, a área experimental vem sendo conduzida com o foco na intensificação sustentável da pecuária a partir do manejo dos sistemas integrados para a produção de gado de corte. A partir de estudos que têm comprovado que esses sistemas promovem aumento do conforto térmico e bem-estar animal (Pezzopane et al., 2019), melhorias nas características físicas, químicas e biológicas do solo (Bernardi et al., 2023), aumento do sequestro de carbono (Oliveira et al., 2024), os sistemas propostos têm se mostrado como uma estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

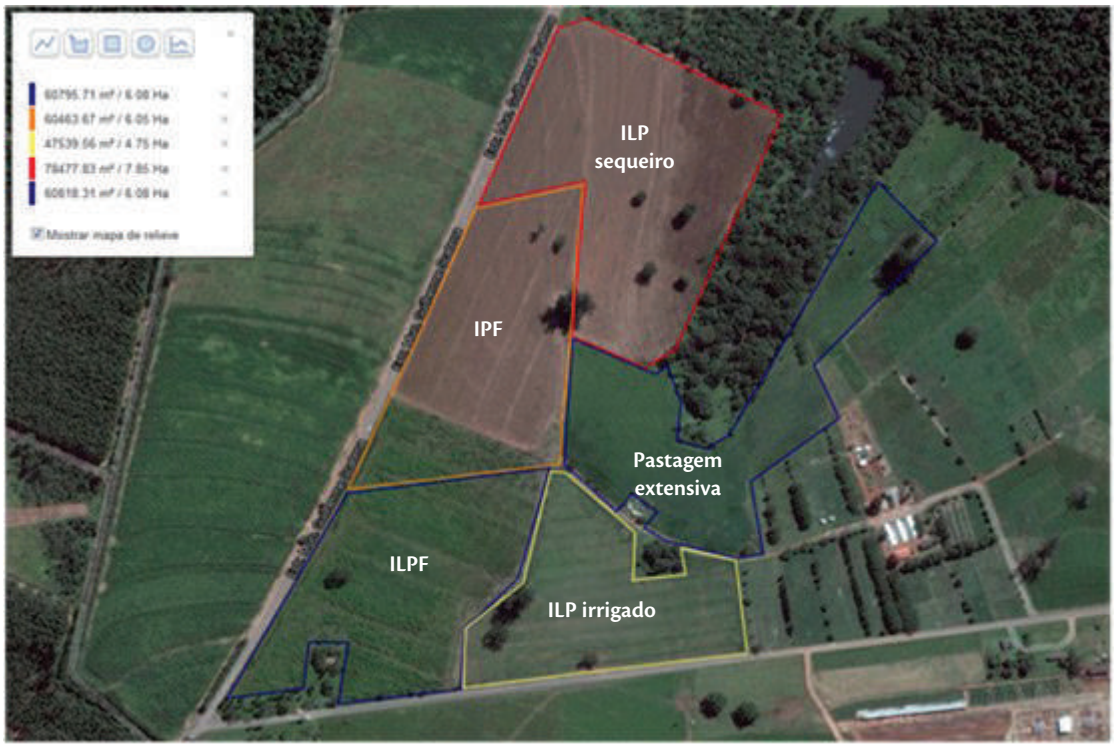
3.2.5 Sistema de integração lavoura-pecuária floresta com *Corymbia citriodora* (ILPF-Leite)

Sistema caracterizado como uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) implementado a partir de um projeto junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento nas modalidades agrossilvipastoril (ILPF) e silvipastoril (IPF), em contraste com sistema agropastoril (ILP) e com pastagem extensiva, com ênfase na produção de leite.

A partir da proposição desses modelos de produção, a URT tem a missão de corroborar coeficientes técnicos e indicadores ambientais para a proposta de criação de protocolos de certificação de sistemas de produção leiteiros baseados na neutralidade de emissão de carbono.

Para a composição do URT, foram propostos os seguintes modelos de sistema de produção (Figura 3.16):

1) Sistema de ILP irrigado: sistema agropastoril composto do cultivo milho para silagem consorciado com *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás (Sistema Santa Fé) em condições de irrigação por aspersão. Após 30-40 dias da colheita do milho para silagem, procede-se o pastejo.
2) Sistema de ILP sequeiro: sistema agropastoril composto do cultivo milho para silagem consorciado com capim-paiaguás (Sistema Santa Fé) em condições de sequeiro. Após 30-40 dias da colheita do milho para silagem, procede-se o pastejo.



ILP: integração lavoura-pecuária; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; IPF: integração pecuária-floresta.
Figura 3.16. Sistemas de produção pecuária-floresta para a produção de gado de leite (ILPF-Leite) na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

3) Sistema de IPF: sistema silvipastoril composto de cultivo do eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) consorciado com capim-paiaguás.
4) Sistema de ILPF: sistema agrossilvipastoril composto no primeiro ano de cultivo do eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) consorciado com milho para silagem também consorciado com *Brachiaria brizantha* cv. Paiaguás; no segundo ano se repete este sistema, com pastejos eventuais após a colheita do milho para silagem; e, a partir do terceiro ano, permanece o sistema silvipastoril com espécie florestal consorciada com espécie forrageira para pastejo.
5) Pastagem Extensiva: sistema pastoril composto de *Urochloa* spp. em pastejo sem reposição de nutrientes e sem recuperação das pastagens como testemunha negativa.

O sistema foi implementado em 2017 a partir do preparo de solo e plantio das árvores de eucalipto no espaçamento de 20 metros entre linhas e 3 metros entre plantas (166 árvores ha^{-1}), com orientação de linhas Leste-Oeste (Pereira, 2019). Na safra de 2017/2018, foram implantadas as pastagens solteiras (IPF) consorciadas com milho para a produção de silagem nos ILP Irrigado, ILP Sequeiro (Figura 3.17A) e ILPF (Figura 3.17B).

No ano de 2018, antes do início do pastejo nos sistemas com o componente arbóreo, foram realizados cortes da forragem para a produção de silagem de capim (Figura 3.17C). O pastejo nas áreas de IPF e ILPF teve início nos primeiros meses de 2019, cerca de 20 meses após o plantio das árvores (Figura 3.17D). Na estratégia da produção de rebanho leiteiro na área da URT, ocorre o pastejo diurno por lotes de vacas em produção nos sistemas arborizados, e no período noturno o pastejo é nas áreas a pleno sol (sem arborização).

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A participação de uma equipe multidisciplinar, que abrange diferentes linhas de pesquisa, além das ações de comunicação e transferência de tecnologias em sistemas integrados de produção pecuária, baseadas em experimentos de longa duração aqui apresentados, consolida a contribuição da Embrapa



Figura 3.17. Imagens do sistema integração lavoura-pecuária-floresta-Leite (ILPF-Leite) durante a implantação do consórcio milho-braquiaria nos sistemas ILP (A); e ILPF (B); campo para produção de silagem de capim (C); e sistema em pastejo (D), em São Carlos-SP.

Pecuária Sudeste para a sustentabilidade da agropecuária, segurança alimentar e adaptação e mitigação às mudanças climáticas.

O grande volume de dados coletados, as informações e conhecimentos que estão sendo gerados (e que serão apresentados nos capítulos subsequentes) têm sido alcançados com a utilização ampla e colaborativa dos experimentos pelos parceiros que incluem Universidades, Instituições de Pesquisa e Empresas Públicas e Privadas.

Por isso, a manutenção dos experimentos de campo de longa duração com sistemas integrados é essencial para a investigação dos efeitos dos processos naturais e antropogênicos nos agroecossistemas. Esses experimentos de campo podem se configurar um patrimônio científico para as gerações futuras.

3.4 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

BERNARDI, A. C. C.; ESTEVES, S. N.; BARBOSA, P. F.; VINHOLIS, M. M. B. **Renovação de pastagem e terminação de bovinos em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos, SP: resultados de 3 anos de avaliações.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009. 28 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 24).

BERNARDI, A. C. C.; ADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; MARTIN NETO, L. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical.** 1. ed. Brasilia, DF: Embrapa, 2023. v. 1, p. 569-600.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: Enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

BRUNETTI, H. B.; PASQUINI NETO, R.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; GARCIA, A. R.; PINHO, L. F.; DE SOUSA, A. J. C.; RAMOS, G. G.; BERNARDI, A. C. C.; PEDROSO, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Late stages of tropical silvopastoral systems: an opportunity to maximise forage and animal production. **Grass and Forage Science**, v. 80, p. e70010, 2025b. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.70010.

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G.; FONSECA, O. O. M.; SANTOS, R. D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS; São Carlos, SP: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95 p. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de pesquisa, 7; EMBRAPA-CPPSE. Boletim de pesquisa, 2).

CARDOSO, D. J.; NICODEMO, M. L. F.; LACERDA, A. E. B. **Biomassa de vegetação arbórea em floresta secundária com a presença de café (*Coffea arabica* L.), em São Carlos, SP**. Colombo: Embrapa Florestas, 2020. 19 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 335).

CARVALHO, M. M.; BARROS, J. C.; XAVIER, D. F.; FREITAS, V. P.; AROEIRA, L. M. Composición química del forraje de *Brachiaria decumbens* asociada con tres especies de leguminosas arbóreas. In: PRIMER CONGRESO LATINOAMERICANO DE AGROFORESTERÍA PARA LA PRODUCCIÓN ANIMAL SOSTENIBLE; VI SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS AGROPECUARIOS SOSTENIBLES, 6., 1999, Cali. **Memórias** [...]. Cali: CIPAV, 1999.

DEBRECZENI, K.; KÖRSCHENS, M. Long-term field experiments of the world. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 49, n. 5, p. 465-483, 2003. DOI: http://doi.org/10.1080/03650340310001594754.

DIAS-FILHO, M. B. Sistemas silvipastoris na recuperação de pastagens tropicais degradadas. In: SIMPÓSIO DA REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 43., 2006, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: SBZ; UFPB, 2006. p. 535-553. (Suplemento Especial da Revista Brasileira de Zootecnia, v. 35).

ESTEVES, S. N.; BERNARDI, A. C. C.; VINHOLIS, M. M. B.; PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R. **Estimativas da emissão de metano por bovinos criados em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos, SP**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2010. 7 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular Técnica, 65).

LEMES, A. P.; GARCIA, A. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRANDÃO, F. Z.; WATANABE, Y. F.; COOKE, R. F.; SPONCHIADO, M.; DE PAZ, C. C. P.; CAMPLESI, A. C.; BINELLI, M.; GIMENES, L. U. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 14092, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s41598-021-93609-7.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the atlantic forest biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

NICODEMO, M. L. F.; CASTIGLIONI, P. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; THOLON, P.; CARPANEZZI, A. A. Reducing competition in agroforestry by pruning native trees. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 509-518, 2016a. DOI: http://doi.org/10.1590/0100-67622016000300014.

NICODEMO, M. L.; MULLER, M. D.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; CARPANEZZI, A. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BARIONI JÚNIOR, W. Growth of native trees in two agroforestry systems. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 639-648, 2016b. DOI: http://doi.org/10.1590/0100-67622016000400007.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, p. 127219, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219.

PEREIRA, M. A. (ed.). **Avaliação econômica de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: as experiências da Embrapa**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2019. 90 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 268).

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C. ; NICODEMO, M. L. F. ; PEZZOPANE, J. E. M. Photosynthetically active radiation in a silvopastoral system in Southeastern Brazil. In: WORLD CONGRESS SILVO-PASTORAL SYSTEMS 2016, 2016, Evora. **Proceedings** [...]. Evora: Universidade de Evora, 2016. v. 1. p. 101-101.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015.

PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; ROCHA, E. L. F.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Reducing competition in a crop–livestock–forest integrated system by thinning eucalyptus trees. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 4, p. 574-586, 2020a. DOI: http://doi.org/10.1017/S0014479720000162.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agrícola**, v. 77, n. 2, p. e20180150, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. P. A.; PEDROSO, A. F.; CAMARGO, A. C.; RASSINI, J. B.; ROCHA FILHO, J.; OLIVEIRA, G. P.; CORREA, L. A.; ARMELIN, M. J. A.; VIERIA, S. R.; DECHEN, S. C. F. **Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim: um modelo real de laboratório ambiental**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 1999. 133p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa, 5).

RASMUSSEN, P. E.; GOULDING, K. W. T.; BROWN, J. R.; GRACE, P. R.; JANZEN, H. H.; KÖRSCHENS, M. Long-term agroecosystem experiments: assessing agricultural sustainability and global change. **Science**, v. 282, n. 5390, p. 893-896, 1998. DOI: http://doi.org/10.1126/science.282.5390.893.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Climatic classification of Köppen and Thornthwaite sistems and their applicability in the determination of agroclimatic zonning for the state of São Paulo, Brazil. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007. DOI: http://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022.

SILVA, L. A.; SOARES, J. J. Composição florística de um fragmento de floresta estacional semidecídua no município de São Carlos-SP. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 647-656, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-67622003000500007.

ZIMMER, A. H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; SANTAROSA, E.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BUNGENSTAB, D. J.; OMOTE, H. S. G.; DEBIASI, H.; SOUZA FILHO, H. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; VINHOLIS, M. M. B.; CARRER, M. J.; GUERREIRO, M. F. Sistemas ILPF e transferência de tecnologia nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência detecnologia, avaliação da adoção e de impactos**. 1. ed. Brasilia, DF: Embrapa, 2019. v. 1, p. 234-280.

Capítulo 4

Infraestrutura Digital para Pesquisa *on-farm*

Alberto Carlos de Campos Bernardi, Alexandre Rossetto Garcia, André Luiz Monteiro Novo, Edilson da Silva Guimarães, Danilo Serra da Rocha, José Ricardo Macedo Pezzopane, Waldomiro Barioni Júnior, Sergio Raposo de Medeiros, Teresa Cristina Alves, Alexandre Berndt



RESUMO: O uso das tecnologias digitais aprimora a compreensão das complexas interações entre clima, solo, culturas e animais nos sistemas integrados. A coleta e análise de dados temporais, espaciais e individuais possibilitam o maior conhecimento e facilitam as decisões de manejo e gestão. A pesquisa on-farm com tecnologias digitais e de pecuária de precisão em sistemas ILPF tem grande potencial para ampliar sua adoção e contribuir para eficiência produtiva, econômica e ambiental. A Embrapa Pecuária Sudeste conta com infraestrutura digital avançada para validar e otimizar estas tecnologias. A infraestrutura de experimentação on-farm é descrita, detalhando os componentes do sistema ciberfísico de automação, como sensores, atuadores, processadores, controladores, dispositivos, e módulos de comunicação da área experimental em São Carlos-SP. Os resultados obtidos têm mostrado que estas tecnologias transformam o campo em um ecossistema inteligente, no qual a união da ciência e da prática é essencial para superar desafios e promover práticas inovadoras de manejo, promovendo avanços do conhecimento, mas também recomendações práticas e aplicadas, tanto das tecnologias digitais, quanto dos sistemas ILPF.
Palavras-chave: Agricultura de Precisão; Pecuária de Precisão; Tecnologias Digitais; Drones; Identificação Eletrônica; Automação Agrícola.

ABSTRACT: The application of digital technologies significantly enhances the comprehension of the intricate interactions among climate, soil, crops, and animals within integrated systems. The collection and analysis of temporal, spatial, and individual-level data are instrumental in deepening understanding and informing precision management decisions. On-farm research leveraging digital technologies and Precision Livestock Farming (PLF) within Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) Systems have substantial potential to accelerate adoption and

https://doi.org/10.4322/9786586819427-4

yield gains in productivity, economic viability, and environmental efficiency. Embrapa Pecuária Sudeste possesses advanced digital infrastructure dedicated to validating and optimizing these technologies. This document proceeds to describe the on-farm experimentation infrastructure, detailing the components of the cyber-physical automation system. These components include sensors, actuators, processors, controllers, devices, and communication modules, implemented within the experimental area in São Carlos-SP. The results obtained indicate that these technologies transform the field into an intelligent ecosystem, where the synthesis of science and practical application is paramount. This integration is crucial for overcoming existing challenges and for promoting innovative management practices, thereby advancing scientific knowledge and providing concrete, applied recommendations for both digital technologies and ICLF systems.

Keywords: Precision Agriculture; Precision Livestock Farming; Digital Technologies; Drones; Electronic Identification; Agricultural Automation.



Graphical abstract: Infraestrutura digital para pesquisa *on-farm*.

4.1 AGRICULTURA, PECUÁRIA DE PRECISÃO E AGRICULTURA DIGITAL

Para a Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (International Society of Precision Agriculture, 2024), a agricultura de precisão (AP) é uma estratégia de gestão que integra a coleta, processamento e análise de dados temporais, espaciais e individuais, combinando-os com outras informações relevantes. O objetivo é otimizar a tomada de decisões, considerando a variabilidade do ambiente agrícola, para aprimorar a eficiência no uso de recursos, a produtividade, a qualidade dos produtos, a rentabilidade e a sustentabilidade da produção.

Essa definição abrangente também se aplica ao manejo de pastagens, um aspecto crucial na produção de ruminantes, que exige a consideração tanto das pastagens quanto do componente animal. A pecuária de precisão (PP) foi definida por Berckmans (2017) como a gestão individual de animais por meio do monitoramento contínuo em tempo real da saúde, bem-estar, produção, reprodução e impacto ambiental.

A agricultura digital (AD) integra os conceitos da AP e PP, conectividade agrícola, sistemas de informação geográfica e a automação agrícola na forma mais abrangente. É um conjunto de métodos computacionais de alto desempenho, rede de sensores, comu-

O processo típico de AP e PP pode ser resumido em três etapas:

- **Coleta de dados:** etapa inicial com a aquisição de dados relevantes, que podem incluir informações sobre o solo, clima, topografia, características das culturas ou animais, entre outros. A coleta pode ser realizada por meio de diversas tecnologias, como sensores remotos, drones, estações meteorológicas e sistemas de monitoramento animal.
- **Processamento e análise de informações:** os dados coletados são então processados e analisados para identificar padrões, variabilidades e tendências. Ferramentas de software e técnicas estatísticas são utilizadas para transformar os dados brutos em informações úteis para a tomada de decisões.
- **Implementação de mudanças na gestão:** com base nas informações obtidas na análise, são implementadas mudanças nas práticas de manejo. Isso pode envolver a aplicação de insumos de forma variável, o ajuste de planos de alimentação animal, a adoção de técnicas de manejo específicas para diferentes áreas da propriedade, entre outras ações.

nicação de máquina para máquina (M2M), conectividade entre dispositivos móveis, computação em nuvem, métodos e soluções analíticas para processar grandes volumes de dados e construir sistemas de suporte para a tomada de decisões de manejo, englobando agricultura e pecuária de precisão, automação e robótica agrícola, técnicas de big data e internet das coisas (Embrapa, 2020).

A PP e AD têm potencial para levar avanços significativos à pecuária, provendo os produtores e técnicos de ferramentas poderosas para otimizar a produtividade e promover a sustentabilidade (Bernardi et al., 2024). A capacidade de coletar, processar e analisar dados temporais, espaciais e individuais, e de combinar o conhecimento consolidado das ciências agrárias, engenharias e informática, pode apoiar as decisões de gestão considerando as variabilidades observadas, e pode ser muito útil, em especial nos sistemas integrados, com as várias combinações de espécies de animais e culturas anuais, semiperenes e perenes. Isso porque, nos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), as interações entre clima, solo, culturas e animais são complexas e podem ser sinérgicas ou competitivas, dependendo dos arranjos espaciais adotados ao longo do tempo. Por isso, o uso da agricultura e pecuária de precisão e das tecnologias digitais melhoram a compreensão da dinâmica espaço-temporal e das interações dos componentes dos sistemas integrados.

4.1.1 Pesquisas *on-farm*

A pesquisa *on-farm* desempenha um papel crucial no desenvolvimento e implementação de tecnologias ILPF, pois é uma metodologia colaborativa que envolve a participação ativa de agricultores, pesquisadores e *stakeholders* da indústria, visando aprimorar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Pires et al., 2024a, 2024b). O uso de ferramentas digitais em pesquisa *on-farm* é relativamente recente, mas está se disseminando muito devido às tecnologias e estratégias de implantação, avaliação e interpretação que permitem gerar conhecimento específico, considerando as variações espaciais e temporais (Pires et al., 2024b).

Essa abordagem permite a validação de inovações agronômicas em condições edafoclimáticas reais, fornecendo dados empíricos vitais sobre a eficácia e adaptabilidade de novas tecnologias e práticas (Kyveryga, 2019; Pires et al., 2024a). A incorporação de critérios ecológicos e estratégias de pesquisa participativa amplia o escopo e o impacto da pesquisa *on-farm*, especialmente no contexto do manejo de sistemas pecuários (Loker et al., 1997; Krampe, et al., 2024).

A condução de pesquisa *on-farm* em pecuária apresenta desafios singulares; fatores como a participação dos agricultores, barreiras culturais e linguísticas, e restrições logísticas podem prejudicar a eficácia dos esforços de pesquisa (Gwaze, et al., 2011). No entanto, o aprimoramento da comunicação e colaboração entre pesquisadores e agricultores pode resultar em adoção mais bem-sucedida de novas tecnologias (Baker et al., 1988). Adicionalmente, o desenvolvimento de estru-

turas de análise de dados e ferramentas de visualização pode melhorar a tomada de decisões e a disseminação dos resultados da pesquisa (Laurent et al., 2019).

Ao integrar as tecnologias digitais e o sistema ILPF com a pesquisa *on-farm*, os técnicos e produtores podem refinar suas práticas, melhorar a produtividade e aumentar o bem-estar animal, reduzindo os impactos ambientais e aperfeiçoando o retorno econômico. O impacto da pesquisa *on-farm* é evidente em sua capacidade de aprimorar as práticas agrícolas e promover a agricultura sustentável. Estudos têm demonstrado que os agricultores são mais propensos a adotar práticas validadas por meio da pesquisa *on-farm*, o que pode levar ao aumento da produtividade e à sustentabilidade ambiental (Pires et al., 2024a). A natureza colaborativa da pesquisa *on-farm* também fomenta a inovação e a transferência de conhecimento, beneficiando tanto os agricultores quanto a comunidade rural em geral (Kyveryga, 2019; Pires et al., 2024a, 2024b).

As inovações na PP extrapolam as aplicações para além dos limites da propriedade, que tipicamente se restringem à otimização da eficiência e ao monitoramento animal. As novas dimensões dos sistemas de pecuária de precisão incluem o compartilhamento de dados com diferentes elos da cadeia de valor, com certificadores e organizações de controle, com outros agricultores, e empresas inovadoras, sob rigorosa governança de dados (Krampe, et al., 2024).

As tecnologias digitais possibilitam que os sistemas integrados também considerem as preocupações prementes sobre qualidade e segurança dos produtos, segurança alimentar, conforto e bem-estar animal, impactos ambientais das atividades agropecuárias, tornando-se mais transparente e promovendo maior confiança do consumidor (Massruhá, et al., 2020). No entanto, novas tecnologias de PP ainda estão evoluindo e precisam ser validadas em escala.

As tecnologias digitais e a PP ampliaram as possibilidades de realizar testes em ambientes de produção ao nível de propriedades rurais, oferecendo assim uma oportunidade para coleta de dados científicos, mas também de validação de tecnologias, e com isso servindo tanto aos profissionais da pesquisa como aos de transferência de tecnologias.

Uma das linhas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) da Embrapa Pecuária Sudeste tem sido direcionada para aplicação, desenvolvimento e validação das ferramentas digitais nos sistemas de produção agropecuários, para obter alta produtividade e qualidade dos produtos com menores impactos negativos ao meio ambiente (Bernardi et al., 2018). Este trabalho contribui para o aumento da produtividade, desenvolvendo tecnologias de grande impacto nas cadeias produtivas da carne e do leite bovino e da carne ovina. Com o uso de tecnologias digitais, de AP e PP, e internet das coisas (IoT), a Embrapa Pecuária Sudeste possui robusta infraestrutura de equipamentos de automação e PP para pesquisa e desenvolvimento dos sistemas integrados. Visando ao constante intercâmbio de conhecimento e inovação, mantém parcerias com diferentes empresas e instituições nacionais e internacionais alinhadas às demandas do setor produtivo, visando à troca do conhecimento e à inovação.

A infraestrutura de sistemas digitais para pesquisa *on-farm* nos sistemas integrados (ILPF-Corte, ILPF-Leite e SSP-Nativas) está conectada e, atualmente, conta com: i) receptor GNSS RTK; ii) sistema de identificação eletrônica animal; iii) drones para geração de imagens de culturas e animais; iv) balança eletrônica de autopesagem; v) bebedouro eletrônico para controle individual de consumo de água; vi) cocho com aferição automática de consumo; vii) medida automática de emissões de gases de efeito estufa; viii) confinamento experimental automatizado; ix) sensor de comportamento e bem-estar animal; x) termografia infravermelha (IRT); xi) estações meteorológicas automáticas; xii) amostrador automático de solo; xiii) ordenha automática voluntária (robô).

4.1.2 Infraestrutura básica para sistemas digitais: conectividade e eletrificação

A conectividade rural é a base para a implementação da AP e PP, pois permite que cada componente do sistema ciberfísico opere de maneira coordenada e eficiente. Desse modo, é um facilitador para a utilização de novas tecnologias digitais de forma eficiente no campo. No entanto, a falta de acesso à internet de qualidade em áreas rurais é o principal obstáculo para a adoção das tecnologias digitais que se baseiam na integração de dados e automação (Dibbern et al., 2024). A conectividade no campo possibilita a comunicação entre dispositivos, máquinas e sistemas. De acordo com a ConectarAGRO (2025), apenas 48% dos imóveis rurais brasileiros têm cobertura 4G ou 5G, ou seja, a maior parte da área rural produtiva ainda não possui uma cobertura de internet de alta velocidade.

As principais tecnologias de conectividade que estão sendo utilizadas para tornar a AP e PP uma realidade no campo são: i) redes 4G e 5G, que oferecem alta velocidade e baixa latência, essenciais para a transmissão de grandes volumes de dados e para a comunicação em tempo real entre máquinas; ii) internet via satélite, que é uma solução viável para áreas remotas onde a infraestrutura terrestre de telecomunicações é limitada ou inexistente; iii) *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), uma tecnologia de rede projetada especificamente para dispositivos de Internet das Coisas (IoT) e permite que sensores de baixo consumo de energia se comuniquem a longas distâncias.

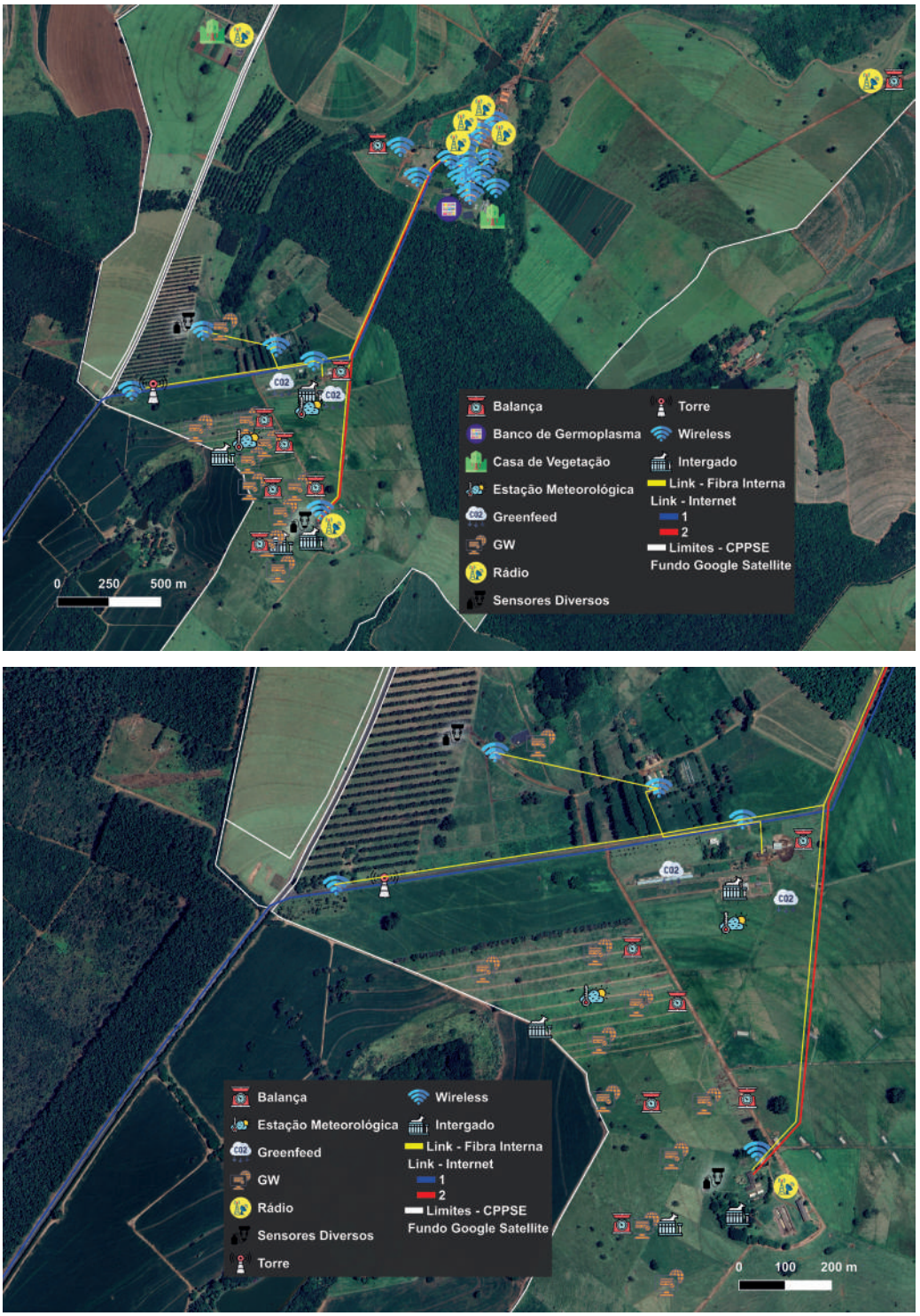
A conectividade rural no Brasil tem avançado, mas ainda enfrenta desafios significativos para atingir todo o território, especialmente nas áreas mais remotas. Cerca de 34% da área disponível para uso agrícola no Brasil tem cobertura 4G ou 5G, e a maior concentração está no Sul e Sudeste brasileiro.

A situação atual da área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste não é diferente da situação da maioria das propriedades rurais brasileiras, ou seja, não há cobertura de sinal 4G ou 5G. Para operacionalizar a estrutura digital na área experimental da Fazenda Canchim (sede da Embrapa Pecuária Sudeste), alternativas que pudessem conectar todos os componentes como sensores, atuadores, processadores, controladores, dispositivos e módulos de comunicação foram implementadas. Dessa forma, o Centro de pesquisa conta com duas conexões externas de internet redundantes. Uma delas utiliza a Rede Metropolitana de São Carlos (Rede Sanca) para conectar a área experimental à UFSCar, e a Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) (Brasil, 2025), a qual integra a instituição a um ecossistema acadêmico e científico nacional, oferecendo acesso seguro e de alta velocidade (um gigabits por segundo – Gbps). A segunda alternativa é o Backbone SP, uma rede de fibra óptica de 100 Gbps que conecta instituições de ensino e pesquisa em São Paulo, operada pela Rednesp (*Research and Education Network at São Paulo*) (Fapesp, 2025) com apoio da Fapesp, que integra as instituições e serve como infraestrutura para supercomputadores e processamento de grandes volumes de dados. A Figura 4.1 ilustra a localização dos componentes e elementos do sistema ciberfísico de automação e que viabilizam a conexão, a coleta, o envio, o armazenamento e a disponibilização de dados na área experimental, e que são detalhados a seguir:

1) *Data Center* com conexão interna e externa, conta com elevada capacidade de armazenamento e processamento de dados, proporcionando suporte eficiente aos projetos de pesquisa de diversas áreas;
2) Rede interna: nos *backbones* (conexão entre o *data center* e as bordas ou edifícios), a comunicação é realizada por fibra óptica para locais próximos e por rádio para locais mais distantes. Destaca-se ainda que há uma rede interna destinada exclusivamente para *Internet of Things* (IoT);
3) Apps de rede sem fio conectam sensores, atuadores e dispositivos móveis à rede interna via *access points*. Esses *access points* têm alcance de 100 a 1.000 metros de raio. No sistema ILPF-Corte, que faz uso de dispositivos móveis para o monitoramento dos animais, foi implementada uma rede *mesh* (em malha) com sinal Wi-Fi, visando à coleta detalhada de dados do comportamento dos animais. Atualmente, está em andamento uma iniciativa voltada para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e rastreamento de animais por meio da tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE), com foco em localização em tempo real e garantia da rastreabilidade.
4) No sistema ILPF-Leite, o processo de ordenha automática é conectado a um *switch* de borda, que estabelece comunicação tanto com o *data center* quanto com a Internet;
5) Estações meteorológicas podem operar de forma manual ou automática, por meio de conexão *wi-fi* aos pontos de acesso (*access points*).

Além da conectividade, a implantação da AP e PP exige uma base sólida de eletrificação rural de qualidade. A eletrificação rural impulsiona o desenvolvimento de ações econômicas, como o agronegócio e a inclusão social das comunidades. A plena adoção das tecnologias de AP e PP no Brasil é frequentemente dificultada pela qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica nas áreas rurais. Os desafios atuais da infraestrutura elétrica convencional representam um gargalo para o crescimento e a eficiência do setor.

A infraestrutura elétrica rural no Brasil, em muitas regiões, foi estabelecida com foco em atender cargas de consumo básicas, como iluminação e pequenas máquinas. Essa infraestrutura, na grande maioria das vezes, não foi dimensionada para as demandas crescentes da agricultura digital. Os principais problemas incluem instabilidade na tensão e frequência (com picos e quedas de energia), interrupções não progra-



Fotos: Danilo Serra da Rocha.

Figura 4.1. Esquema dos componentes do sistema ciberfísico de automação da área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos-SP.

madas frequentes, acesso limitado ou inexistente e o custo elevado da expansão da rede.

A energia solar fotovoltaica emerge como a solução ideal para os problemas de eletrificação rural, ofere-

cendo não apenas uma fonte limpa de energia, mas também energia de alta qualidade (inversores fotovoltaicos convertem a corrente elétrica com tensão e frequência estáveis), autonomia e confiabilidade (com baterias de armazenamento *off-grid*), acesso (facilidade de instalação) e redução de custos (Chowdhury, 2025).

A Embrapa Pecuária Sudeste tem utilizado a energia solar fotovoltaica não apenas como uma alternativa energética (Figura 4.2), mas uma solução completa que endereça a autonomia, a confiabilidade e a qualidade que a agricultura digital demanda. Os *hubs* de conectividade são compostos por antenas, placas solares e baterias para uso de energia fotovoltaica. Os equipamentos apresentados a seguir, como os sensores de comportamento animal, balanças de passagem, cochos, bebedouros fazem uso dessas tecnologias.

4.2 Sistemas digitais na Embrapa Pecuária Sudeste com potencial de uso em pesquisa *on-farm*

A infraestrutura de experimentação *on-farm*, que é detalhada a seguir, tem permitido a geração de dados de pesquisa em PP e automação aplicados à produção de carne e leite, com foco em eficiência produtiva, econômica e ambiental.

4.2.1 Receptor GNSS-RTK

O equipamento receptor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de dupla frequência (L1/L2), diferentemente do receptor GNSS de navegação que oferece precisão na ordem de metros, representa um avanço significativo no campo do posicionamento por satélites, por permitir a obtenção de precisão centimétrica em tempo real. Isso porque o receptor L1/L2 utiliza medições da fase da onda portadora dos sinais de satélite, proporcionando exatidão e precisão consideravelmente superiores. A precisão centimétrica alcançada por esse equipamento torna-o essencial em diversas aplicações que exigem alta exatidão, como levantamentos topográficos, construção civil, AP, mapeamento e navegação de veículos autônomos. Tem-se destacado como uma das tecnologias mais precisas para georreferenciamento e navegação na AP, tornando-o essencial para aplicações como na semeadura, colheita, tratos culturais, piloto automático, mapeamento de produtividade ou aplicação de insumos à taxa variável (Guo et al., 2018). Por isso, optou-se pela utilização dessa tecnologia na área experimental, ampliando a exatidão e a precisão das medidas.

A Embrapa Pecuária Sudeste possui o receptor GNSS com correção *Real Time Kinematic* (RTK) (Figura 4.3). O sistema RTK é composto por duas unidades principais: uma estação base fixa e um receptor móvel ou *rover* (Valente et al., 2020). A estação base, posicionada sobre um marco com coordenadas conhecidas, recebe sinais dos mesmos satélites observados pelo *rover*. Com base nessa referência, a base calcula os erros presentes nos sinais e transmite em tempo real correções ao *rover*. Ao aplicar essas correções, o *rover*



Fotos: Alberto Carlos de Campos Bernardi.

Figura 4.2. Painel solar para geração de energia para os equipamentos da pecuária de precisão.



Foto: Gisele Rosso.

Figura 4.3. Equipamento GNSS-RTK e receptor móvel (*rover*).

é capaz de determinar sua posição com alta precisão, mesmo permanecendo apenas alguns segundos sobre o ponto de interesse.

É importante ressaltar que este receptor GNSS não se limita a receber dados da constelação *Global Position System* (GPS), sistema administrado e mantido pelo Departamento de Defesa dos EUA, especificamente pela Força Espacial Americana. O receptor também é compatível com outros sistemas GNSS (Guo et al., 2018; Valente et al., 2020), como GLONASS (russo), Galileo (europeu) e BeiDou (chinês). Essa compatibilidade expande ainda mais as possibilidades de aplicação do RTK, tornando-o uma ferramenta versátil e poderosa para o posicionamento preciso em tempo real.

4.2.2. Identificação eletrônica animal

A identificação eletrônica animal individual é fundamental para rastreabilidade, melhoramento genético e gestão pecuária, além de ser o requisito básico para sistemas de produção modernos e atendimento a mercados exigentes. Além disso, é condição obrigatória para a adesão ao Programa Nacional de Rastreabilidade Animal, por meio do Sistema Brasileiro de Identificação e Certificação de Bovinos e Bubalinos (SISBOV). A Embrapa Pecuária Sudeste tem contribuído significativamente para o avanço da identificação animal no Brasil (Giro et al., 2019a; Garcia et al., 2020), desenvolvendo e validando tecnologias que combinam precisão, praticidade e confiabilidade (Barioni Júnior et al., 2024). Esses avanços são essenciais para a modernização da pecuária nacional e atendimento às demandas globais por rastreabilidade.

A identificação eletrônica de animais por radiofrequência (*Radio Frequency Identification*, RFID), como brincos eletrônicos e identificadores subcutâneos (RFID/*Glasstag*), tem como foco principal o desenvolvimento e aplicação de tecnologias de identificação para a gestão e rastreabilidade dos rebanhos. A identificação individual dos animais pode ser realizada de forma eletrônica ou manual, de maneira invasiva ou não invasiva, por meio de brincos, *transponders* injetáveis, bolus intrarruminais, sistemas biométricos, entre outros (Barioni Júnior et al., 2024). A identificação por radiofrequência pode ser considerada como uma das primeiras tecnologias aplicadas à pecuária de precisão (Aquilani et al., 2022).

O processo inclui a identificação individual de animais, vinculando todas as ocorrências/fatos de interesse. Não necessariamente os registros incluem todo o ciclo para fins de rastreabilidade de carne, mas para outros fins, por exemplo a rastreabilidade do leite, e é fundamental para a aplicação de tecnologias de pecuária de precisão. A identificação individual eletrônica por rádio e o armazenamento e transmissão dos dados são componentes-chaves para monitorar o consumo e desempenho dos animais em tempo real e continuamente. O brinco eletrônico auricular, tipo *botton*, com identificação por RFID, tem sido o mais utilizado no país.

Entre os desafios e perspectivas da identificação eletrônica individual de animais está a necessidade de redução de custos para adoção em larga escala, o desenvolvimento de sistemas mais robustos para condições tropicais e a integração com tecnologias como *blockchain* (Cao et al., 2021) para garantia de autenticidade.

A Embrapa Pecuária Sudeste foi pioneira na introdução da identificação eletrônica de animais por RFID,

em uma parceria público-privada com uma empresa nacional (Barioni Júnior et al., 2016). Como resultados do projeto, foram desenvolvidos o brinco eletrônico tipo *botton* (*transponder* auricular), alicate de aplicação, bastão de leitura (*transceptor*), compondo um sistema de gerenciamento e rastreabilidade genuinamente brasileiro para bovinos de corte. Após a validação e homologação da tecnologia, o sistema eletrônico de identificação foi implantado em 100% dos animais (bovinos de corte, bovinos de leite, ovinos e equinos) da Fazenda Canchim (Barioni Júnior et al., 2024).

Os animais do rebanho da Fazenda Canchim, considerando apenas a tecnologia RFID, são identificados da seguinte forma: ovinos e cavalos com *transponders* injetáveis no pé da orelha e na tábua do pescoço, respectivamente; os bovinos de corte recebem ao nascimento um *transponder* injetável no pé da orelha e, posteriormente, um *botton* auricular quando atingirem idade adulta; nos bovinos de leite, aplicam-se *transponders* injetáveis na prega do úbere e um *botton* auricular. Os dados coletados vinculados aos identificadores eletrônicos (*tranponders*), tipo *botton* e injetável, têm conexão como outros identificadores usados na unidade, como a marca de fogo, tatuagem, colar e brinco visual não eletrônico. Nessa unidade de pesquisa, além do gerenciamento do rebanho, do registro genealógico, dos índices zootécnicos e do controle patrimonial, os dispositivos digitais são integrados a outros sistemas de precisão para otimizar e garantir a confiabilidade dos dados obtidos nos experimentos (Barioni Júnior et al., 2024). A Figura 4.4 ilustra um bastão de leitura de identificadores eletrônicos de

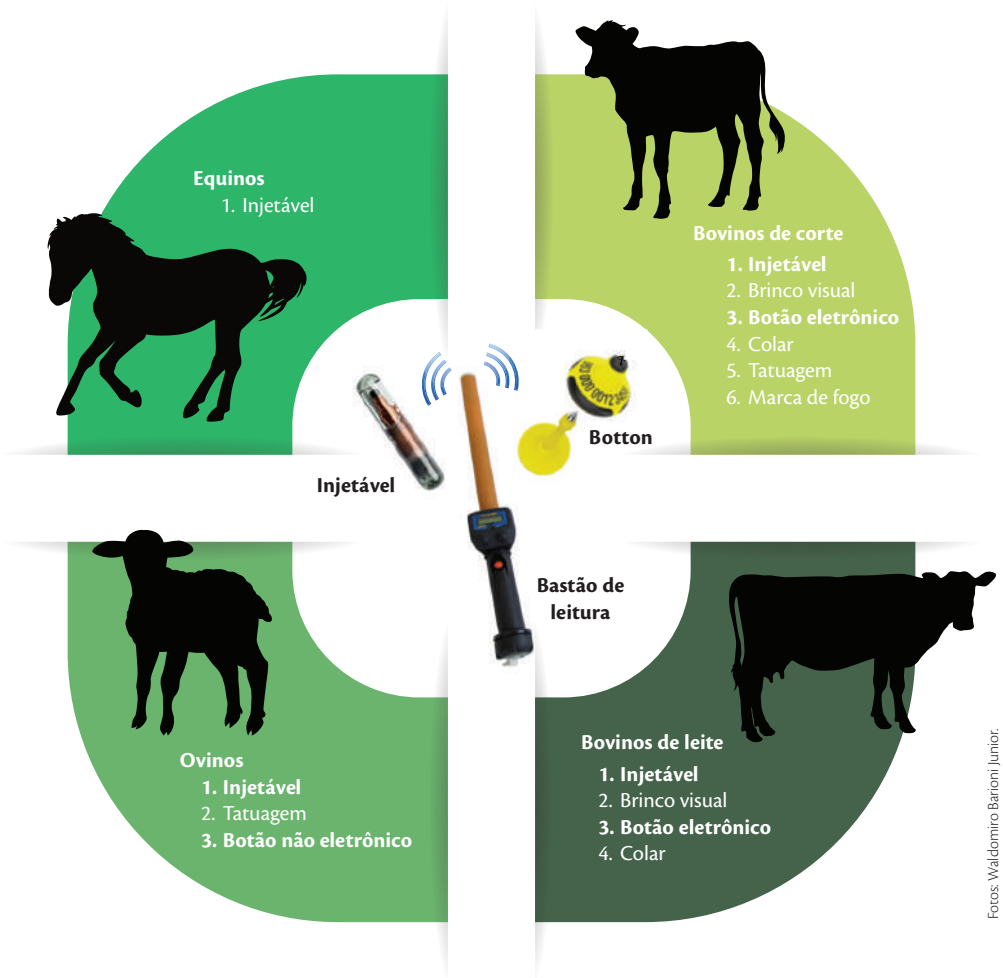


Figura 4.4. Identificação eletrônica de equinos, ovinos e bovinos de corte e leite na Embrapa Pecuária Sudeste. Os dispositivos eletrônicos estão destacados em negrito.

animais, *transponder* tipo *botton* (auricular) e injetável, e descreve outras identificações praticadas na unidade pelo tipo de animal: equino, ovino, bovino de corte e bovino de leite. Atualmente, a Embrapa Pecuária em parceira público-privado, também está desenvolvendo dispositivo para identificação e rastreabilidade animal com base na tecnologia *Bluetooh low energy* (BLE).

4.2.3. Drone

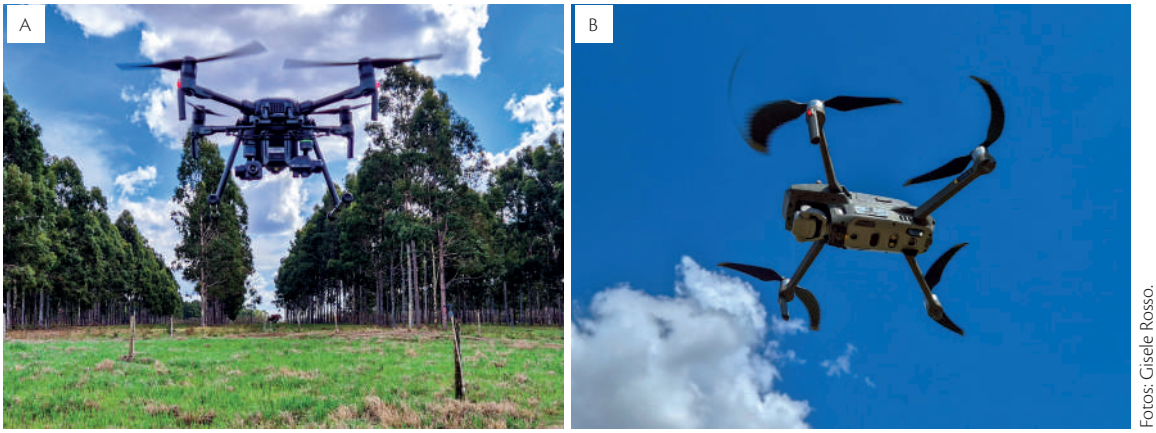
As aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), ou drones, tornaram-se ferramentas essenciais na AP e tiveram um desenvolvimento notável nas últimas décadas. Modificaram práticas agrícolas, oferecendo aos agricultores economias substanciais de custos, maior eficiência operacional e melhor lucratividade. Apresentam múltiplas vantagens em comparação com outras tecnologias de sensoriamento remoto, como imagens de alta qualidade e alta resolução em dias nublados, disponibilidade e velocidade de transferência de dados, são econômicas e de fácil configuração e manutenção (Tsouros et al., 2019; Rejeb et al., 2022). E a revolução deverá continuar ao integrar novas tecnologias, como alto poder computacional, sensores avançados e inteligência artificial (IA). Isso permite uma ampla gama de aplicações no manejo de culturas, incluindo mapeamento, monitoramento e diagnóstico de plantas (Rejeb et al., 2022).

Os drones representam uma revolução na AP, oferecendo soluções precisas, sustentáveis e escaláveis. Com o avanço da IA, IoT e conectividade rural, espera-se uma adoção ainda maior nos próximos anos, consolidando-os como pilares da digitalização da agricultura, em especial, no sensoriamento remoto e na AP e PP.

Atualmente, na Embrapa Pecuária Sudeste, as equipes de pesquisas utilizam duas ARPs no desenvolvimento das pesquisas (Figura 4.5): (1) ARP (sistema térmico duplo), que possui uma câmera visual de alta resolução para captura de vídeo profissional, com resolução de até 4K Ultra HD, e uma câmera térmica M2ED de alta qualidade, para detecção de variações de temperatura e identificação de pontos quentes e frios com precisão e exatidão; (2) ARP2, equipado concomitantemente com câmera multiespectral para captura de imagens multiespectrais abrangendo diversas faixas de comprimento de onda, o que amplifica sua utilidade em análises detalhadas do ambiente, e câmera termal que captura imagens de alta resolução (640 x 512 pixels) no espectro infravermelho, e é capaz de detectar a temperatura de objetos em tempo real.

4.2.4. Balança eletrônica de autopesagem

As tecnologias digitais de pesquisa *on-farm* que permitem o monitoramento automático e contínuo do comportamento e desempenho dos animais são potenciais alternativas para melhorar os índices produtivos nos sistemas integrados. As medidas automáticas de pesagem dos animais são um indicador-chave de avaliação de desempenho individual (crescimento, comportamento e saúde) e do potencial de produção dos sistemas (estoque animal na propriedade e indicadores econômicos) e, ainda, auxiliar na seleção para melhoramento genético (Aquilani et al., 2022; Bernardi et al., 2024). Além disso, contribuem para a economia de mão de obra, tempo e bem-estar animal (González-Garcia et al., 2018).



Fotos: Gisele Rosso.

Figura 4.5. Aeronaves remotamente pilotadas (ARPs): com câmera de alta resolução e térmica (A) e com câmera multiespectral (B).

O peso corporal de bovinos é um indicador essencial para a tomada de decisões estratégicas de manejo, envolvendo genética, nutrição, saúde e ganho de peso. Essa variável tem influência direta da dieta, da saúde e do bem-estar dos animais (Bernardi et al., 2024). No contexto específico do manejo de pastagens, a pressão de pastejo é determinada pelo consumo animal, que, por sua vez, está intrinsecamente ligado ao peso corporal. Em gado de corte, o peso corporal é um fator determinante do desempenho e uma informação fundamental para a decisão de abate. Para garantir a máxima precisão na avaliação do peso do rebanho, é imprescindível realizar medições periódicas e repetidas.

As pesagens podem ser realizadas diretamente com o uso de balanças convencionais, em centros de manejo ou em plataformas de pesagem automática (Embrapa, 2017). O esquema adotado para instalação desses equipamentos em um dos sistemas integrados (ILPF-Corte, Capítulo 3) foi nas entradas das áreas de acesso à água e ao cocho de suplementação mineral dos animais com identificador individual, conforme proposto por Aquilani et al. (2022). Dessa forma, os animais são obrigados a subir ou passar pelos equipamentos e têm seu peso registrado a cada entrada e saída, gerando um intenso controle do ganho de peso médio diário e possibilitando estudos com diferentes grupos genéticos, nutricionais e comportamentais. Como os animais possuem identificadores eletrônicos de RFID de alta frequência (entre 3 e 30 MHz), detalhado anteriormente, ocorre a vinculação do peso registrado ao animal. Informações adicionais, como horário da pesagem e frequência de visitas, também podem ser registradas. Nas balanças de passagem, produzidas, por exemplo, pelas empresas nacionais, a pesagem é feita com o animal em movimento. Nesse caso, é necessário utilizar um algoritmo para estimar o peso.

Há, também, balanças de plataforma que pesam o animal estaticamente, pois o bebedouro se encontra do lado oposto da entrada da balança, forçando-o a subir na balança para alcançar a água e permanecer parado enquanto consome a água. A pesagem é realizada com apenas as duas patas dianteiras do animal, exatamente por ter menor variação em relação às quatro patas sobre a balança. Um sistema semelhante produzido no Brasil pesa os animais com o corpo integralmente na plataforma, com resultados adequados. Há detalhes construtivos que diferem essas duas opções no posicionamento das células de carga, uma vez que o produto nacional é localizado embaixo da plataforma, enquanto na configuração do produto internacional, na parte superior, exatamente para evitar que o acúmulo de sujeira comprometa o funcionamento da balança. Já uma vantagem do sistema de pesagem da Intergado é que a antena de leitura do chip de identificação (RFID Full Duplex) é ativada apenas quando um sensor infravermelho detecta a presença do animal no cocho, o que confirma a presença do animal e evita falsas marcações de acesso ao cocho.

O sistema adotado nos sistemas ILPF utiliza os equipamentos apresentados na Figura 4.6 e Figura 4.7. Entre as melhorias implementadas estão o uso de energia solar, usando painéis de células fotovoltaicas com baterias, e os sistemas de transmissão de dados por *wi-fi*. Para alcançar os benefícios que os equipamentos podem fornecer, González-Garcia et al. (2018) sugerem a adaptação dos animais e o uso de técnicas para remover valores discrepantes do conjunto de dados antes da interpretação.



Fotos: Alberto Carlos de Campos Bernardi.

Figura 4.6. Balanças de passagem.



Foto: Gisele Rosso.

Figura 4.7. Balança conjugada ao bebedouro eletrônico.

4.2.5 Bebedouro com aferição automática de consumo

A obtenção de dados sobre ingestão de água é uma preocupação mais recente, pois há uma cobrança crescente sobre a pegada hídrica da pecuária. A água utilizada pelos animais para dessedentação se enquadra na categoria de água azul. Embora represente a menor parcela da pegada hídrica da carne brasileira, é fundamental avaliar também toda a água verde, proveniente da chuva, e buscar o uso cada vez mais eficiente desse recurso. O equipamento associa a ingestão de água à pesagem do animal, ou seja, a cada vez que o animal procura água, ele é obrigado a subir na balança de autopesagem automática e tem seus dados registrados, como relatado anteriormente. O peso do bebedouro após o animal deixar a balança é o peso final da ingestão, e o peso previamente ao acesso é usado como peso inicial. Do peso inicial é subtraído o peso final, resultando no consumo de água daquela visita. Em geral, cada animal faz várias visitas no período de um dia, e o somatório de todas elas será o valor total de consumo diário individual do animal. Nessa configuração, além do número e do horário das visitas, é possível estimar a taxa de ingestão dos animais em cada visita, por período do dia ou a taxa média de ingestão diária (Garcia et al., 2024b).

O bebedouro com aferição automática de consumo serve como um excelente sistema de alerta, pois é improvável que um animal não vá pelo menos uma vez ao bebedouro. Assim, quando os dados do sistema indicarem a ausência de informações de determinado animal, deve-se realizar uma avaliação das possíveis causas, que podem incluir desde problemas com o brinco, passando pela saída do animal do lote, até a ocorrência de problemas de saúde. Um fator importante no uso do bebedouro automático, especialmente naqueles em que o consumo de água depende de o animal subir na balança, é a adaptação do animal à estrutura. A primeira recomendação é ter um sistema convencional redundante tanto para o período de adaptação, até que os animais se habituem a subir na balança e usar o bebedouro, como para eventuais problemas técnicos que o deixem fora de serviço (Figura 4.8). A Embrapa Pecuária Sudeste tem utilizado bebedouros eletrônicos instalados tanto em pesquisas de sistemas de confinamento de gado de corte (Novelli et al., 2023), quanto em pesquisas envolvendo sistemas de produção a pasto, em pastagens em monocultura ou em ILPF (Garcia et al., 2024b).

Em experimento conduzido em São Carlos, durante 152 dias, foram monitorados touros jovens Nelore e Canchim criados em sistemas de produção a pasto, com acesso irrestrito a bebedouros eletrônicos. Os animais também passaram por avaliações de tempe-



Foto: Sergio Raposo de Medeiros.

Figura 4.8. Imagem do confinamento experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP, mostrando, em primeiro plano, o bebedouro convencional "tipo australiano" e, logo atrás, intervenção humana para estimular os primeiros acessos dos animais à balança.

ramento em curral de manejo, utilizando acelerômetros para quantificar a intensidade e a frequência de seus movimentos. A frequência de visitas diárias ao bebedouro foi 7,4% menor para animais Canchim, porém estes apresentaram maior consumo hídrico diário (15,1±8,8 vs 20,9±10,2 L/dia; P<0,05). Foi detectado que o consumo hídrico diário se relaciona diretamente com a reatividade do animal (r=0,19). Assim, a tecnologia de sensoriamento eletrônico da ingestão de água a pasto permitiu detectar diferenças entre raças quanto ao padrão do consumo hídrico e no temperamento dos animais, informações inéditas que podem abrir novas perspectivas para a gestão dos sistemas de produção a pasto (Garcia et al., 2024b).

Uma outra aplicação do bebedouro eletrônico foi na estimativa do consumo de água por bovinos leiteiros no período de lactação (Figura 4.9). O trabalho mostrou a integração do brinco eletrônico RFID (na orelha da vaca) com o bebedouro eletrônico que vincula, automaticamente via *bluetooth*, o número eletrônico do brinco com o consumo diário individual de água de cada vaca (Barioni Júnior et al., 2017). A estimativa do consumo necessário por vaca por dia, visando ao bem-estar do animal, no período de lactação foi entre 56,7±0,7 e 59,6±0,7 litros por vaca em função da dieta.

4.2.6 Cocho com aferição automática de consumo

Para avaliar o consumo diário da dieta, têm-se utilizado os cochos importados do Canadá (Figura 4.10) e nacionais (Figura 4.11), que determinam diariamente a quantidade de alimento ingerida. O sistema nacional é o que está atualmente em uso; seu funcionamento se baseia em reconhecer o animal por dispositivo eletrônico RFID ao adentrar no cocho e medir o consumo apenas se um sensor de infravermelho está bloqueado pela presença do animal. Isso garante contar os acessos apenas para o animal que realmente está consumindo a dieta no cocho. Ao deixar o cocho, a redução de peso medida é atribuída a esta visita do animal, sendo essa quantidade considerada uma refeição. Normalmente, os animais visitam o cocho várias vezes, e o somatório das refeições, nas 24 horas do dia, é o consumo individual diário. Importante lembrar que esse consumo é da dieta *in natura* e, portanto, precisa ser convertido em matéria seca. Faz-se necessário, portanto, ao longo do experimento, medir periodicamente a matéria seca da dieta para ter valores confiáveis desta variável ao longo do tempo e, assim, poder aplicar esse índice na transformação da dieta *in natura* para a dieta em matéria seca (MS). Ao aliar essa informação à do ganho de peso no período com o consumo da MS, obtém-se a eficiência alimentar, ou seja, a quantidade de carne produzida com ingestão de cada quilograma de MS da dieta.

4.2.7 Medida automática de emissões de gases de efeito estufa

A principal fonte de emissões de gases de efeito estufa no setor da agricultura é o metano entérico,



Fotos: Waldomiro Barioni Junior.

Figura 4.9. Detalhe do brinco *Radio Frequency Identification* (RFID) na orelha da vaca (A): reservatório de água do bebedouro eletrônico (B); animal acessando o bebedouro (C) e animal bebendo água (D).

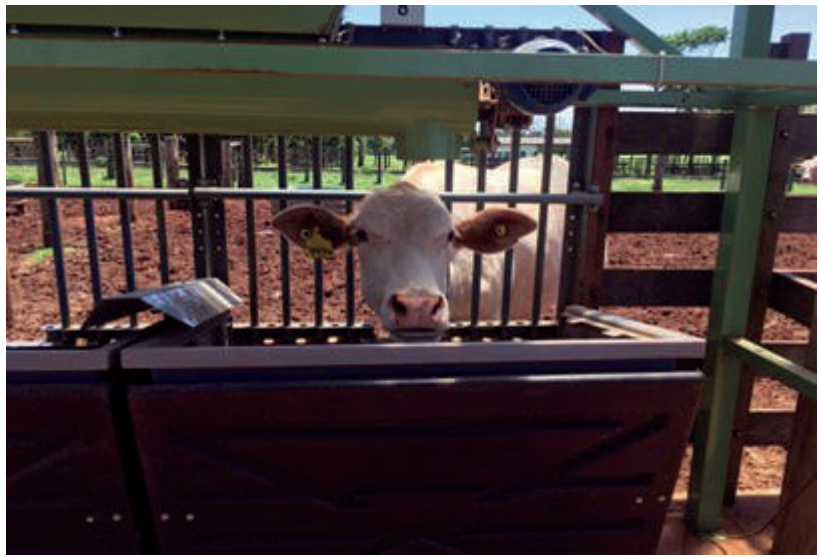


Foto: Alberto Carlos de Campos Bernardi.

Figura 4.10. Cocho com aferição automática de consumo.



Figura 4.11. Painel de controle dos equipamentos usados no confinamento experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, ladeado por dois pares de cochos, sendo os do primeiro plano do Lote 1 e, ao fundo, do Lote 2.

Foto: Sergio Raposo de Medeiros.

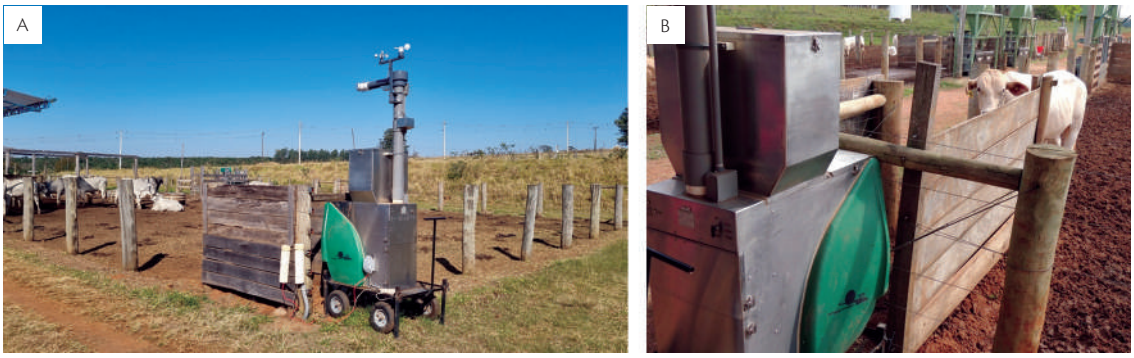
produzido no processo de digestão dos ruminantes. A determinação da quantidade de metano produzida por um animal ao longo do dia e acumulada no ciclo de produção é de fundamental importância. Um equipamento largamente utilizado para essa medição é produzido nos Estados Unidos, um sistema automatizado de determinação de fluxo de gases (Figura 4.12). Sua principal vantagem é determinar, em tempo real, o fluxo de emissão de metano (CH_4) a cada visita do animal, sem interferir com o seu comportamento. Além disso, ele pode ser equipado com sensores para medida de dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). A Figura 4.12 mostra uma unidade do equipamento em operação no confinamento experimental da Embrapa Pecuária Sudeste. Pode-se observar no topo os instrumentos de medidas de velocidade e direção do vento, dados que são, entre vários outros, usados para validar a medida do fluxo de gás de cada visita. A produção de metano é variável ao longo do dia, assim, essa medida de curto espaço de tempo (medida "spot") precisa ser repetida algumas vezes durante o dia para que os modelos e algoritmos utilizados possam calcular uma emissão diária acumulada.

Para atrair o animal até a câmara de coleta, a estratégia é oferecer frações de ração peletizada. Isso faz com que ele tente ir repetidamente ao equipamento para comer mais, todavia, o sistema permite uma programação que limita a quantidade de ração oferecida, assim como distribui as visitas ao longo de 24 horas. É necessário um período mínimo de três minutos a cada visita para medidas representativas de CH_4 e CO_2 (Arthur et al., 2017). Esses mesmos autores mostraram que, com medidas de três minutos, seriam necessárias 30 medidas ao longo dos dias de mensuração para a obtenção de uma média acurada da taxa de produção de CH_4 e CO_2, o que se obtém com a média de vários dias de coleta.

Previamente ao experimento, um formulário deve ser inserido na plataforma de dados da empresa com informações sobre os animais, números dos seus brincos RFID, o tratamento, fotos da localização dos equipamentos, etc., de maneira que os dados sejam recebidos por eles e computacionalmente tratados, selecionando as visitas válidas em função do tempo mínimo de coleta, da distância da cabeça do animal na câmara, das condições de vento, etc. É necessário, antes e ao final do experimento, fazer protocolos de recuperação de carbono e, no mínimo, a cada 15 dias, calibrar o equipamento com gases com concentrações certificadas (padrões).

4.2.8 Confinamento experimental

A terminação de bovinos é a etapa final no ciclo de produção do gado de corte, com objetivo da preparação dos animais para o abate. Durante esse processo, prioriza-se a eficiência de peso e adequado acabamento de carcaça, caracterizado por um nível ideal de gordura subcutânea. A terminação dos animais produzidos nos sistemas integrados pode ser conduzida de distintas maneiras, em função do sistema produtivo adotado e da estratégia definida pelo pecuarista, sendo as mais usuais a terminação a pasto, semiconfinamento e confinamento. Ao longo dos vinte anos de estudo, foram utilizadas as três formas de terminação dos bovinos.



Fotos: Sergio Raposo de Medeiros (A) e Ana Maio (B)

Figura 4.12. Equipamento de medição do fluxo de emissão de metano (CH4) em operação no confinamento da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP (A-B).

No caso do confinamento experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, há um componente extra, pois existe uma combinação de tecnologias digitais para a medição do consumo de alimentos, ingestão de água, peso do animal e emissão de gases de efeito estufa, que permite relatar as três principais métricas de metano (CH_4) utilizadas: a emissão diária (g CH_4 por cabeça por dia), o rendimento por unidade de matéria seca ingerida (g CH_4 por kg de matéria seca da dieta) e a intensidade de emissão (g CH_4 por kg de ganho de peso).

Detalhando o conjunto de equipamentos automatizados atualmente usados no confinamento experimental, temos, conforme a Figura 4.13: (1) cochos com balanças para determinação do consumo da dieta por animal, com identificação eletrônica por RFID; (2) balanças de passagem instaladas de maneira que o animal seja pesado cada vez que procure se dessedentar; (3) bebedouros com balanças para determinação do consumo de água, com identificação eletrônica por RFID; e (4) mensuração da emissão de metano e dióxido de carbono.

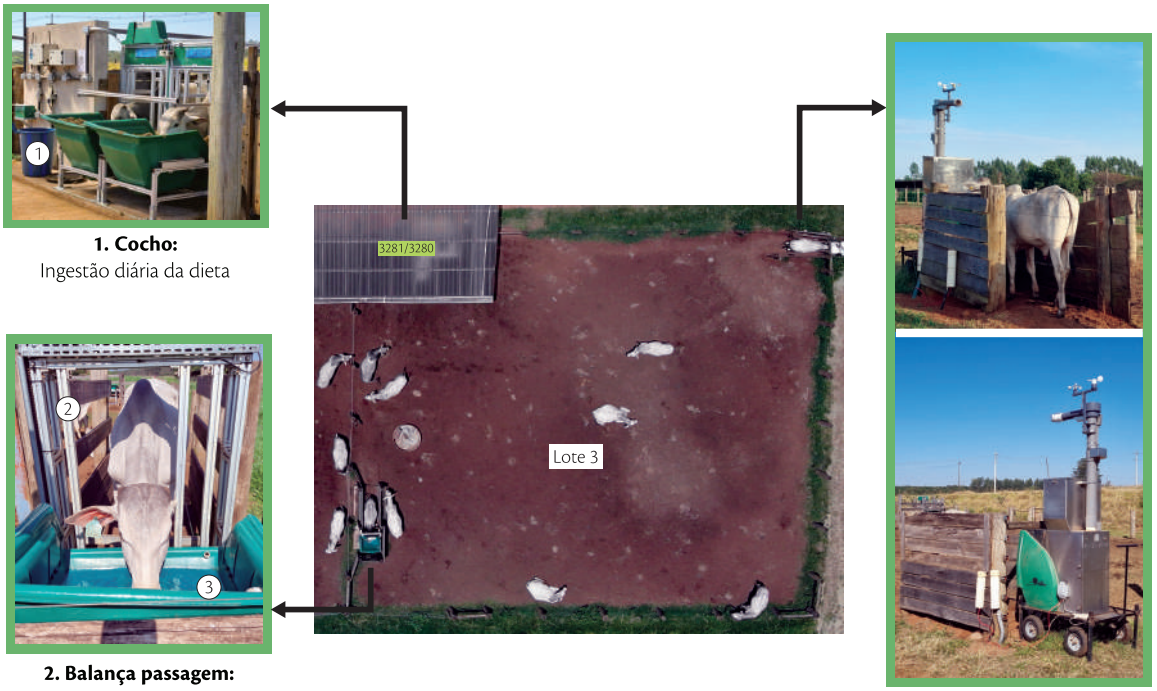
O conjunto de equipamentos permite a obtenção de medidas complementares importantes sobre o comportamento ingestivo dos animais, ao informar o número, duração, frequência e horários das visitas nos cochos e bebedouros. Por exemplo, é possível determinar, entre outras informações, a hierarquia estabelecida no grupo, a taxa de ingestão individual, o tempo gasto na alimentação, dessedentação, etc. De modo semelhante as informações são enviadas à central de dados, que as valida e oferece acesso on-line aos relatórios. Uma vantagem adicional que esse sistema automatizado tem, por ter dados diários, é permitir períodos de experimentação mais curtos para dados confiáveis de eficiência alimentar (Kearney et al., 2004).

Desde 2011, esses avanços tecnológicos foram incorporados ao Confinamento Experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, e até 2018 os cochos para consumo dos animais eram produzidos por uma empresa canadense (Figura 4.10), tendo, então, sido substituídos pelos atuais nacionais (Figura 4.11). Há várias publicações com dados gerados no confinamento experimental (Méo-Filho et al., 2020; Novelli et al., 2022; Conteville et al., 2023; Melo et al., 2023, Berndt et al., 2024), confirmando seu grande potencial de geração de informações.

4.2.9 Sensores de comportamento e bem-estar animal

A infraestrutura para avaliação do comportamento de bovinos criados a pasto foi implementada no sistema ILPF-Corte da Embrapa Pecuária Sudeste no ano de 2016, a partir de recursos próprios da unidade e de recursos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, via Termo de Cooperação. A partir de um esforço conjunto entre iniciativa pública e privada, foi desenvolvida uma rede tipo *mesh* para garantir a conectividade das áreas de pastagens em monocultura e no sistema integrado. Isso incluiu o desenvolvimento de um sistema completamente alimentado por energia fotovoltaica, capaz de cobrir 30 hectares e de prover o monitoramento dos animais mantidos nessas pastagens de forma ininterrupta (Garcia et al., 2019). Esse trabalho disruptivo gerou o primeiro sistema de monitoramento eletrônico de bovinos de corte criados a pasto no mundo, cujos primeiros resultados de pesquisa foram publicados em 2018 (Garcia et al., 2018), e que serviu de modelo para sistemas similares posteriormente adotados, em menor escala, em outras propriedades.

Os equipamentos incluem colares dotados de acelerômetros e antenas para captação de dados, fabri-



1. Cocho:
Ingestão diária da dieta

2. Balança passagem:
Pesagem diária

3. Bebedouro:
Ingestão diária de água

4. Medidor de metano:
Emissão diária

Figura 4.13. Esquema mostrando todas as medidas automatizadas que podem ser realizadas no confinamento experimental da Embrapa Pecuária Sudeste: consumo da dieta; peso do animal; ingestão de água; e emissão de metano entérico. Cada um dos quatro piquetes tem todo o conjunto de equipamentos.

cados por empresa brasileira. Os dados gerados pelos colares podem ser acessados de qualquer local, dentro ou fora do campo experimental, onde haja conexão à internet. A interpretação dos dados é realizada por software proprietário da mesma empresa. Com esse sistema, é possível identificar padrões comportamentais dos animais, como o tempo de deslocamento nas pastagens, ou tempo dedicado ao ócio e à ruminação. A Figura 4.14 mostra animais em sistema de ILPF, monitorados a campo com acelerômetros embarcados em colares. Os resultados de comportamento com uso desses equipamentos foram descritos em Garcia et al. (2018), Barreto et al. (2019), que estudaram o comportamento de fêmeas e de machos bovinos criados em sistema de produção em pastejo rotacionado com sombreamento natural ou em sistemas com escassez de sombreamento natural. Esses trabalhos foram relevantes para o maior entendimento da fisiologia e do comportamento de bovinos criados em sistemas integrados (detalhes são apresentados no Capítulo 10).

4.2.10 Termografia infravermelha (IRT)

A termografia infravermelha (*infrared thermography*, IRT) tem sido utilizada como ferramenta auxiliar no diagnóstico de afecções e na avaliação da condição térmica dos bovinos criados nos sistemas integrados. Em linhas gerais, a termografia infravermelha opera como uma ferramenta de diagnóstico não invasiva e não destrutiva, capaz de mapear e exibir informações de calor de forma remota. Essa metodologia explora o fenômeno da radiação, a partir da emissão eletromagnética inerente a qualquer objeto com temperatura superior ao zero absoluto (-273,15 °C), em que cessaria todo movimento molecular. A radiação na faixa do infravermelho, invisível aos olhos humanos, é percebida pela lente de uma câmera termográfica. O equipamento processa essa informação e a traduz em uma representação pictórica (Figura 4.15), na qual variações de temperatura são associadas a diferentes cores, em paletas de cores à escolha do usuário, permitindo uma análise intuitiva e análises matemáticas objetivas (Garcia et al., 2024a).



Figura 4.14. Bovinos monitorados por acelerômetros acoplados a colares em experimento relativo a sistema de integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-corte) na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

Foto: Alexandre Rossetto Garcia.

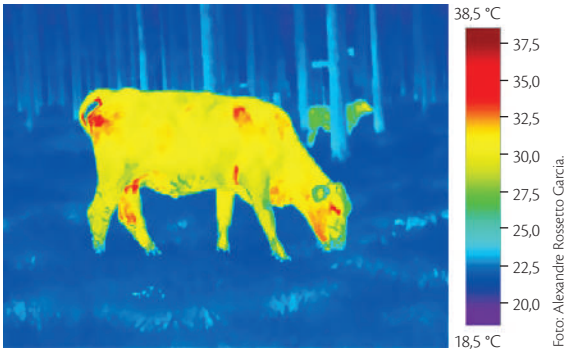


Figura 4.15. Termografia de vaca bovina criada em sistema sombreado na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

Os fundamentos técnicos e científicos da IRT e suas principais aplicações na produção animal, com enfoque nas espécies bovina, ovina e bubalina, vêm sendo explorados na pesquisa moderna (Giro et al., 2019a; Rodrigues et al., 2023; Vilela et al., 2022). O uso de equipamentos de alta resolução e performance tem aberto novas perspectivas para identificar fenômenos associados à biologia térmica dos animais, até então desconhecidos e "invisíveis". Por isso, a IRT foi utilizada para avaliação de bovinos em sistemas integrados, como demonstrado por Giro et al., (2019a, 2019b), Romanello et al., (2023). Nesse contexto, a IRT tem potencial para o apoio a técnicos e a produtores rurais na tomada de decisões mais objetivas e assertivas, visando melhorar os processos de diagnóstico precoce e de monitoramento da saúde e bem-estar animal, a fim de aumentar a eficiência dos sistemas de produção.

4.2.11 Estação meteorológica automática

A estação meteorológica automática é composta por equipamentos que coletam e armazenam informações sobre o clima (temperatura, umidade e pluviosidade) nos sistemas integrados, como forma de caracterizar e diferenciar os sistemas a pleno sol e os sistemas sombreados (ILPF-Corte, ILPF-Leite e SSP-Nativas). Os sensores eletrônicos de temperatura e umidade relativa do ar (termo-higrômetros), velocidade do vento (anemômetro ultrassônico bidirecional), temperatura do globo negro (termopares de cobre) e radiômetros (quantômetros) são acoplados a registradores de dados, que permitem a obtenção de relatórios detalhados de informações (Figura 4.16). A obtenção desses dados tem auxiliado na caracterização ambiental dos diferentes sistemas ILPF (Pezzopane et al., 2015, Bosi et al., 2020), modelagem (Bosi et al., 2022; Balcão et al., 2024) e na tomada de decisões (Pezzopane et al., 2024). O Capítulo 5 detalha esses resultados ao abordar o microclima nos sistemas ILPF.

4.2.12 Amostrador automático de solo

A análise de solo para recomendação de calagem e fertilizantes é um procedimento baseado em métodos químicos que avaliam a disponibilidade de nutrientes para as culturas. Essa técnica é essencial para orientar o manejo nutricional, pois, por meio da interpretação dos resultados, permite a correção e adubação eficientes e economicamente viáveis. O balanço de nutrientes no sistema solo-planta também é um indicador da sustentabilidade do uso agrícola da terra (Bernardi, 2024).

A abordagem mais utilizada no Brasil para o mapeamento das características do solo envolve a amostragem em grade com coordenadas georreferenciadas, análises em laboratório e a criação de mapas por interpolação (Bernardi et al., 2015; Bernardi, 2024). Contudo, as altas densidades de amostragem podem ser limitadas pelas dificuldades operacionais e pelos altos custos das análises laboratoriais. Além disso, a qualidade da amos-



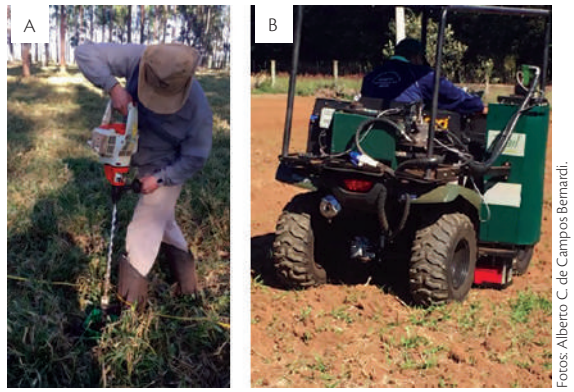
Foto: José Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 4.16. Estação meteorológica automática no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte).

tragem do solo tem um efeito significativo na precisão da aplicação de corretivos e fertilizantes, pois podem ser influenciadas pela profundidade da amostragem, número de subamostras e sua distribuição dentro de um talhão ou piquete (Lütticken, 2000).

Considerando-se o grande número de amostras de solo necessárias para o mapeamento e aplicação de nutrientes de forma localizada, o método de amostragem precisa ser rápido, econômico e preciso para fornecer informações confiáveis. Os sistemas tradicionais de amostragem de solo em uso com sondas e trados manuais não permitem o controle automático da profundidade precisa da amostragem do solo e do número de subamostras. A utilização de amostradores mecanizados (Figura 4.17) oferece diversas vantagens (Jensen et al., 2024; Nicoletti et al., 2023; Lütticken, 2000) em comparação com os métodos tradicionais (como o trado holandês ou a sonda manual), especialmente em operações de larga escala ou com alta demanda de produtividade, redução do tempo de amostragem, menor esforço físico, padronização e consistência (profundidade e volume) das amostras, menor contaminação cruzada entre pontos de coleta, amostragem em solos compactados ou secos, maior capacidade de penetração, integração com tecnologias de precisão (registrando automaticamente as coordenadas e rastreamento de cada amostra).

O sistema que tem sido utilizado é o amostrador motorizado e automatizado (Figura 4.17B), que combina



Fotos: Alberto C. de Campos Bernardi.

Figura 4.17. Amostradores de solo mecanizados manual (A) e automático (B).

trado mecanizado, georreferenciamento automático e gestão digital de dados. O amostrador mecanizado utiliza um trado acoplado a um quadriciclo. As profundidades de amostragem (0-20 cm e 20-40 cm, por exemplo) podem ser definidas conforme o interesse agronômico. O sistema faz o georreferenciamento automático, pois é equipado com GPS de precisão. O equipamento também permite a medida da resistência à penetração (MPa ou kgf cm^{-2}) por um penetrômetro acoplado ao sistema mecanizado (com sensor de carga, controle de profundidade e taxa de penetração), registrando a força necessária para inserir o trado no solo. E ainda da umidade do solo (% volumétrica ou $m^3\ m^{-3}$), medida por uma sonda de capacitância acoplada ao sistema.

Foto: Teresa Cristina Alves.



Figura 4.18. Rebanho na ordenha robotizada da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

4.2.13 Sistemas robotizados de ordenha

Enquanto o uso de robôs nos cultivos vegetais ainda estava em seus estágios iniciais de desenvolvimento e adoção (Martin et al., 2022), os sistemas robotizados de ordenha já eram uma realidade na produção animal em diversos países (Rodenburg, 2017) e no Brasil (Silvi et al., 2021; Diavão et al., 2024), evidenciados pela crescente taxa de adoção. O sistema robotizado de ordenha, automático (AMS, do inglês *Automatic Milking System*) ou voluntário (VMS, do inglês *Voluntary Milking System*), possibilita que as vacas sejam ordenhadas sem a intervenção humana, tornando o processo mais flexível e menos laborioso (Rossing et al., 1997; Svennersten-Sjaunja; Pettersson, 2008).

Os sistemas têm o potencial de aumentar a produção de leite, diminuir o emprego de mão de obra nas propriedades, além de melhorar o bem-estar do produtor e das vacas leiteiras. Nesses sistemas automatizados, os sensores monitoram e registram automaticamente o volume de leite, parâmetros de qualidade do leite e frequência de ordenha dos animais, alimentando um grande arquivo de dados de todos os processos realizados sem a intervenção humana. O sistema permite aumentar a frequência de ordenha, que afeta positivamente a produção de leite. Os parâmetros analisados podem ser a ordem de lactação, fase de lactação, produção de leite, peso do animal, ingestão de concentrado, número de ordenhas e recusas. Efeitos positivos significativos na saúde do úbere e no tratamento dos tetos foram observados em alguns estudos (Svennersten-Sjaunja; Pettersson, 2008).

A produção de leite em pastagens é o principal sistema de produção no Brasil, por isso há o desafio de buscar as diferentes formas de motivar as vacas a visitarem a sala de ordenha, entre elas está a menor distância entre o galpão de ordenha e o pasto, fornecimento de alimentação suplementar, acesso a água e uso de sinais acústicos, que foram testadas com sucesso. A experiência que vem sendo utilizada na Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos-SP (Figura 4.18) indica que o uso dos sistemas robotizados e vacas em pastejo, e com rotinas de manejo adequadas, possibilita atingir um nível de produção e bem-estar animal nesses sistemas, que são equivalentes aos sistemas convencionais de ordenha (Alves et al., 2024).

Com o equipamento, tem sido possível conduzir pesquisas no sistema ILPF-Leite avaliando tanto o comportamento das vacas no tocante à frequência

de visitas ao robô de ordenha, bem como ao padrão de tempo de permanência e duração das ordenhas (Garcia et al., 2024c), além da sanidade do rebanho leiteiro (Fraga et al., 2024; Zafalon et al., 2024).

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modernização da agricultura brasileira, impulsionada por sistemas integrados e tecnologias digitais, exige uma abordagem colaborativa, multidisciplinar e que transcenda os limites dos setores público e privado. A urgência em conciliar produtividade com sustentabilidade, especialmente diante de desafios como as mudanças climáticas e a segurança alimentar, torna essa abordagem não apenas uma opção, mas uma necessidade estratégica. Essa colaboração é a chave para viabilizar pesquisas e inovações que, de fato, cheguem ao produtor rural.

O uso das tecnologias digitais aprimora a compreensão das complexas interações entre clima, solo, culturas e animais nos sistemas integrados. A coleta e análise de dados temporais, espaciais e individuais possibilitam o maior conhecimento e facilitam as decisões de manejo e gestão.

A pesquisa *on-farm* com tecnologias de pecuária de precisão e digitais em sistemas integrados oferece um potencial significativo para aprimorar a produtividade e a sustentabilidade agrícola. Os resultados alcançados nos trabalhos da equipe da Embrapa Pecuária Sudeste, que unem a investigação científica com a prática em sistemas de produção integrados, possibilitam validar, adaptar e otimizar as tecnologias de digitais e a melhor compreensão dos sistemas. Isso garante que seus benefícios em termos de produtividade, bem-estar animal e sustentabilidade sejam plenamente realizados e amplamente adotados. A abordagem colaborativa e baseada em evidências é fundamental para impulsionar a evolução.

A próxima geração de tecnologias de PP e AD exigirá plataformas analíticas preventivas e preditivas que podem classificar grandes quantidades de dados, enquanto contabilizam variáveis específicas com precisão e acessibilidade. Os desafios de privacidade, segurança e integração de dados são cruciais e interligados para a implantação bem-sucedida de soluções digitais compartilhadas entre diferentes propriedades.

A pesquisa em sistemas integrados e o avanço de tecnologias digitais exigem grandes investimentos e conhecimento especializado, inviáveis para setor público ou privado atuando isoladamente. Dessa forma, as parcerias público-privadas podem ser a combinação ideal, ao unir a *expertise* científica com os recursos e a agilidade do setor privado.

Apesar dos desafios, a abordagem da pesquisa *on-farm* facilita a adoção de práticas e tecnologias inovadoras para a compreensão e manejo, beneficiando, em última análise, os agricultores e contribuindo para o desenvolvimento sustentável dos sistemas agropecuários.

4.4 REFERÊNCIAS

ALVES, T. C.; NOVO, A. L. M.; CHAMILETE, S. A. M.; BREUNIG, K. P. Desafios e oportunidawdes para produção de leite em sistema de ordenha voluntária a pasto. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de Precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2024. p. 736-747. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000062.

ARTHUR, P. F.; BARCHIA, M.; WEBER, C.; BIRD-GARDINER, T.; DONOGHUE, K. A.; HERD, R. M.; HEGARTY, R. S. Optimizing test procedures for estimating daily methane and carbon dioxide emissions in cattle using short-term breath measures. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 2, p. 645-656, 2017. DOI: http://doi.org/10.2527/jas2016.0700.

AQUILANI, C.; CONFESSORE, A.; BOZZI, R.; SIRTORI, F.; PUGLIESE, C. Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. **Animal**, v. 16, n. 1, p. 100429, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100429.

BAKER, G.; KNIPSCHEER, H.; SOUZA-NETO, J. The impact of Regular Research Field Hearings (RRFH) in on-farm trials in Northeast Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 24, n. 3, p. 281-288, 1988. DOI: http://doi.org/10.1017/S0014479700016136.

BALCÃO, L. F.; ANDREUCCI, M.; SNOW, V.; HOLZWORTH, D.; BRUNETTI, H. B.; SANTOS, M. L.; BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. Pasture growth simulation and sensitivity analysis using APSIM-related models in a tropical silvopastoral system. **European Journal of Agronomy**, v. 160, p. 127307, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127307.

BARIONI JÚNIOR, W.; MACHADO, C. G. C. F.; GARCIA, A. R.; ESTEVES, S. N.; PARANHOS, N. E. Avaliação da performance de identificador eletrônico por radiofrequência para bovinos de corte, produzido no Brasil. In: CONGRESSO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, 1., 2016, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis, SC: Instituto Oswaldo Gessulli, 2016. p. 1-5.

BARIONI JÚNIOR, W.; MACHADO, C. G. C. F.; PARANHOS, N. E.; OMOTE, H. S. G.; GUIMARAES, E. S.; BERNARDI, A. C. C.; VINHOLIS, M. M. B.; TONATO, F. Experiência da Embrapa Pecuária Sudeste na identificação eletrônica de animais por rádio frequência. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y.

(ed.). **Agricultura de Precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2024. p. 673-684. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000065.

BARIONI JÚNIOR, W.; NOVELLI, T. I.; MORELLI, M.; PALHARES, J. C. P. Automação do consumo de água de vacas em lactação visando o uso eficiente do recurso natural. In: CONGRESSO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, II, 2017, Florianópolis-SC. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Oswaldo Gessulli, 2017.

BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; ROMANELLO, N.; SOUSA, M. A. P. Monitoramento eletrônico do comportamento de novilhas de corte mantidas em sistema de iLPF. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 29., 2019, Uberaba-MG. **Anais** [...]. Brasília-DF: Associação Brasileira de Zootecnistas, 2019. v. 1, p. 110351.

BERCKMANS, D. General introduction to precision livestock farming. **Animal Frontiers**, v. 7, n. 1, p. 6-11, 2017. DOI: http://doi.org/10.2527/af.2017.0102.

BERNARDI, A. C. C. Adubação à taxa variável e uso eficiente de nutrientes em pastagens. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de Precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos: Editora Cubo, 2024. cap. 77, p. 702-715. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000067.

BERNARDI, A. C. C.; BERNDT, A.; GARCIA, A. R.; NOVO, A. L. M.; GUIMARAES, E. S.; PORTUGAL, J. A. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; PALHARES, J. C. P.; BARIONI, W. **Aplicação da agricultura e pecuária de precisão na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos – SP**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. 4 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Nota Técnica/Nota Científica).

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 211-227, 2015.

BERNARDI, A. C. C.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; GARCIA, A. R.; BARIONI JUNIOR, W.; MEDEIROS, S. R.; SANTOS, S. A. Tecnologias de pecuária de precisão para o manejo de pastagens e animais. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de Precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos: Editora Cubo, 2024. p. 623-635. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000056.

BERNDT, A.; MELO, M. N. V.; AZEVEDO, A. A. S.; PASQUINI NETO, R.; MEDEIROS, S. R.; GOULART, R. S. Methane emission from a diet high in inclusion of co-products from the ethanol industry consumed by Nellore cattle in the feedlot. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 58., Cuiabá, MT. **Anais** [...]. Cuiabá: SBZ, 2024.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Silvopastoral system with Eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. 1-15, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425.

BOSI, C.; HUTH, N. I.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M. APSIM model performance in simulating Piatã palisade grass growth and soil water in different positions of a silvopastoral system with eucalyptus. **Agricultural Systems**, v. 195, p. 103302, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103302.

BRASIL. Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. 2025. Disponível em: https://www.rnp.br/. Acesso em 28 out. 2025.

CAO, S.; POWELL, W.; FOTH, M.; NATANELOV, V.; MILLER, T.; DULLECK, U. Strengthening consumer trust in beef supply chain traceability with a blockchain-based human-machine reconcile mechanism. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 180, p. 105886, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105886.

CHOWDHURY, A. K. Smart renewable energy integration for precision agriculture in off-grid areas. **Applied Agriculture Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2025. DOI: http://doi.org/10.25163/agriculture.3110286.

CONECTARAGRO. **Indicador de conectividade rural**. 2025. Disponível em: https://www.conectaragro.com.br/indicadordeconectividaderural/. Acesso em: 1 set. 2025.

CONTEVILLE, L. C.; DA SILVA, J. V.; ANDRADE, B. G. N.; CARDOSO, T. F.; BRUSCADIN, J. J.; DE OLIVEIRA, P. S. N.; MOURÃO, G. B.; COUTINHO, L. L.; PALHARES, J. C. P.; BERNDT, A.; MEDEIROS, S. R.; REGITANO, L. A. Rumen and fecal microbiomes are related to diet and production traits in Bos indicus beef cattle. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1282851, 2023. DOI: http://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1282851.

DIAVÃO, J.; SILVA, A. S.; SILVI, R. R.; TEIXEIRA, V. A.; TOMICH, T. R.; PAIVA, C. A. V.; CAMPOS, M. M.; MACHADO, F. S.; FERREIRA, R. E. P.; DÓREA, J. R. R.; PEREIRA, L. G. R. Sistemas automatizados de ordenha no Brasil: panorama e percepções. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos: Cubo, 2024. p. 716-723. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000060.

DIBBERN, T.; ROMANI, L. A. S.; MASSRUHA, S. M. F. S. Main drivers and barriers to the adoption of digital agriculture technologies. **Smart Agricultural Technology**, v. 8, n. 100459, p. 100459, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100459.

EMBRAPA. **Balança de Passagem**: BalPass. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/pt/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4214/balanca-de-passagem---balpass. Acesso em: 1 set. 2025.

EMBRAPA. **VII Plano Diretor da Embrapa 2020-2030**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 31 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217274/1/VII-PDE-2020.pdf. Acesso em: 1 set. 2025.

FAPESP. Rednesp (Research and Education Network at São Paulo). 2025. Disponível em: https://bv.fapesp.br/pt/114/rednesp/. Acesso em 28 out. 2025.

FRAGA, M. M.; TONELLI, M. F.; DA SILVA, M. L.; BRASSOLATTI, L. C.; ALVES, T. C.; BARIONI JUNIOR, W.; ZAFALON, L. F. Tratamento seletivo da mastite a secagem em vacas criadas a pasto com ordenha robótica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

QUALIDADE DO LEITE, 10., 2024, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Curitiba: CBQL, 2024. p. 18-19.

GARCIA, A. R.; BARRETO, A. N.; MORAES, M. J.; AZEVEDOS, G. N.; PINHO, L. F.; RAMOS, G. G.; SOUSA, A. J. C. Termografia infravermelha aplicada à pecuária de precisão. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de Precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos: Editora Cubo, 2024a. p. 689-701. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000066.

GARCIA, A. R.; PINHO, L. F.; ALVES, T. C.; ZAFALON, L. F.; PEREIRA, V. S. A.; CASTILHO, E. F.; NANNI COSTA, L.; RAMOS, G. G.; AZEVEDO, G. N.; ZANETTI, L. K.; GRUDZINSKI, C. E.; MORAES, M. J. Differences in water consumption and temperament of young Nelore and Canchim bulls raised on tropical pastures revealed by electronic monitoring. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION LIVESTOCK FARMING, 11., 2024, Bologna. **Proceedings** [...]. Bologna: University of Bologna, 2024b.

GARCIA, A. R.; BARROS, D. V.; OLIVEIRA JUNIOR, M. C. M.; BARIONI JUNIOR, W.; SILVA, J. A. R.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; PESSOA, J. S. Innovative use and efficiency test of subcutaneous transponders for electronic identification of water buffaloes. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, n. 6, p. 3725-3733, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s11250-020-02410-7.

GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; GUIMARAES, E. S.; PEDROSO, A. F.; ROMANELLO, N.; BARRETO, N. A. Configuração de rede informatizada para monitoramento do bem-estar e comportamento de bovinos de corte a pasto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2019, São Carlos, SP. **Anais** [...]. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2019. v. 1, p. 231-235.

GARCIA, A. R.; GIRO, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; GUIMARAES, E. S.; MENDES, E. D. M.; LEMES, A. P.; ROMANELLO, N.; BOTTA, D. **Comportamento de fêmeas bovinas de corte em pastagens sem arborização, avaliado por sistema wireless de monitoramento**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste. 2018. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular Técnica).

GARCIA, A. R.; SOUSA, A. J. C.; BARRETO, A. N. GUIMARÃES. E. D.; BERNARDI, A. C. C.; MARCONDES, C. R.; PEZZOPANE, J. R.; AZEVEDO, G. N.; PILOTO, V. R.; ARRUDA, R. P. Use of a robotic milking system by cows of different genotypes reared in a silvopastoral system. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION LIVESTOCK FARMING, 11., 2024, Bologna. **Proceedings** [...]. Bologna: University of Bologna, 2024c.

GIRO, A.; BERNARDI, A. C. C.; BARIONI JUNIOR, W. B.; LEMES, A. P.; BOTTA, D.; ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Application of microchip and infrared thermography for monitoring body temperature of beef cattle kept on pasture. **Journal of Thermal Biology**, v. 84, p. 121-128, 2019a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.06.009.

GIRO, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BARIONI JUNIOR, W.; PEDROSO, A. F.; LEMES, A. P.; BOTTA, D.; ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. **The Science of the Total Environment**, v. 684, p. 587-596, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377.

GONZÁLEZ-GARCÍA, E.; ALHAMADA, M.; PRADEL, J.; DOULS, S.; PARISOT, S.; BOCQUIER, F.; MENASSOL, J. B.; LLACH, I.; GONZÁLEZ, L. A. A mobile and automated walk-over-weighing system for a close and remote monitoring of liveweight in sheep. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 226-238, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.022.

GUO, J.; LI, X.; LI, Z.; HU, L.; YANG, G.; ZHAO, C.; GE, M. Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 5, p. 895-911, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8.

GWAZE, F.; MWALE, M.; CHIMONYO, M. Challenges encountered in conducting farmer-oriented livestock research among resource-limited farmers of Sub-Saharan Africa: a review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 21, p. 4840-4851, 2011.

INTERNATIONAL SOCIETY OF PRECISION AGRICULTURE. **Precision Ag definition**: International Society of Precision Agriculture. International Society of Precision Agriculture: Monticello: ISPA, 2024. Disponível em: https://www.ispag.org/resource_display/?id=1571&title=The+Full+Precision+Agriculture+Definition. Acesso em: 1 set. 2025.

JENSEN, K. H.; FAEHNDRICH, C. S.; COLZANI, E.; MCCLURE, M. L.; COVEY, K. Rapid soil harvesting using a novel soil auger system for farm-scale soil carbon estimates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 88, n. 1, p. 192-202, 2024. DOI: http://doi.org/10.1002/saj2.20603.

KEARNEY, G. A.; KNEE, B. W.; GRAHAM, J. F.; KNOTT, S. A. The length of test required to measure liveweight change when testing for feed efficiency in cattle. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 44, n. 5, p. 411-414, 2004. DOI: http://doi.org/10.1071/EA02060.

KRAMPE, C.; INGENBLEEK, P. T.; NIEMI, J. K.; SERRATOSA, J. Designing precision livestock farming system innovations: A farmer perspective. **Journal of Rural Studies**, v. 111, p. 103397, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103397.

KYVERYGA, P. On-Farm research: experimental approaches, analytical frameworks, case studies, and impact. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2633-2635, 2019. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2019.11.0001.

LAURENT, A.; KYVERYGA, P.; MAKOWSKI, D.; MIGUEZ, F. A framework for visualization and analysis of agronomic field trials from on-farm research networks. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2712-2723, 2019. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2019.02.0135.

LOKER, W.; VERA, R.; REÁTEGUI, K. Pasture performance and sustainability in the Peruvian Amazon: Results of long-term

on-farm research. **Agricultural Systems**, v. 55, n. 3, p. 385-408, 1997. DOI: http://doi.org/10.1016/S0308-521X(96)00102-3.

LÜTTICKEN, R. E. Automation and standardisation of site specific soil sampling. **Precision Agriculture**, v. 2, n. 2, p. 179-188, 2000. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1011477731156.

MARTIN, T.; GASSELIN, P.; HOSTIOU, N.; FERON, G.; LAURENS, L.; PURSEIGLE, F.; OLLIVIER, G. Robots and transformations of work in farm: a systematic review of the literature and a research agenda. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 4, p. 103747, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s13593-022-00796-2.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; EVANGELISTA, S. R. M. A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; OLIVEIRA, S. R. M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

MELO, M. N. V.; BRUNETTI, H. B.; MEDEIROS, S. R.; GOULART, R. S. Influência da temperatura máxima diária no consumo noturno de bovinos nelore confinados com dietas de elevado nível de fibra. 2023. In: Reunião Annual do Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, 34., 2023, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: CBNA, 2023.

MÉO-FILHO, P.; BERNDT, A.; MARCONDES, C. R.; PEDROSO, A. F.; SAKAMOTO, L. S.; BOAS, D. F. V.; RODRIGUES, P. H. M.; RIVERO, M. J.; BUENO, I. C. S. Methane Emissions, Performance and Carcass Characteristics of Different Lines of Beef Steers Reared on Pasture and Finished in Feedlot. **Animals (Basel)**, v. 10, n. 2, p. 303, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/ani10020303.

NICOLETTI, J. V. M.; FRANCHI, M. R.; MOTOMIYA, A. V. D. A.; MOTOMIYA, W. R.; MOLIN, J. P. Efficiency and quality of soil sampling according to a sampling tool. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 6, p. 480-486, 2023. DOI: http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n6p480-486.

NOVELLI, T. I.; BIUM, B. F.; BIFFI, C. H. C.; PICHARILLO, M. E.; SOUZA, N. S.; MEDEIROS, S. R.; MARTELLO, L. S. Consumption, productivity and cost: Three dimensions of water and their relationship with the supply of artificial shading for beef cattle in feedlots. **Journal of Cleaner Production**, v. 376, p. 134088, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134088.

NOVELLI, T. I.; PALHARES, J. C. P.; MARTELLO, L. S.; DE MEDEIROS, S. R.; RIVERO, M. J. Three environmental dimensions of beef cattle in tropical feedlot: water, nutrients and land. **The Science of the Total Environment**, v. 904, p. 166733, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166733.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G.; PARMEJIANI, R. S. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 110-119, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-4499.0334.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. **Agroforestry Systems**, v. 1, n. 7, p. 1, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01038-y.

PIRES, C. B.; KRUPEK, F.; CARMONA, G.; ORTEZ, O.; THOMPSON, L.; QUINN, D.; REIS, A.; WERLE, R.; KOVÁCS, P.; SINGH, M.; HUTCHINSON, S.; DIAZ, D.; RICE, C.; CIAMPITTI, I.; MCLAIN, J. Perspective of US farmers on collaborative on-farm agronomic research. **Agronomy Journal**, v. 116, n. 3, p. 1590-1602, 2024a. DOI: http://doi.org/10.1002/agj2.21560.

PIRES, J. L. F.; BRANDAO, Z. N.; DE RESENDE, A. V.; GREGO, C. R.; RAMOS JUNIOR, E. U.; VAZ, C. M. P.; FRANCHINI, J. C.; OLIVEIRA, R. P.; BREDEMEIER, C.; VIAN, A. L.; TRENTIN, C. Experimentação *on-farm* no âmbito da agricultura de precisão. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos, SP: Cubo, 2024b. p. 38-43. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000072.

REJEB, A.; ABDOLLAHI, A.; REJEB, K.; TREIBLMAIER, H. Drones in agriculture: a review and bibliometric analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 198, p. 107017, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017.

RODENBURG, J. Robotic milking: technology, farm design, and effects on workflow. **Journal of Dairy Science**, v. 100, n. 9, p. 7729-7738, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11715.

RODRIGUES, J. N. D.; GUIMARÃES, J. D.; FONSECA, J. F.; PENITENTE-FILHO, J. M.; RANGEL, P. S. C.; LÓPEZ, C. J. R.; FREITAS, R. S.; CASTILHO, E. F.; RODRIGUES, L. F. S.; OLIVEIRA, M. E. F.; GARCIA, A. R. Climatic seasons and time of the day influence thermoregulation and testicular hemodynamics in Santa Inês rams raised under humid tropical conditions. **Journal of Thermal Biology**, v. 114, p. 103546, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103546.

ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; SOUSA, M. A. P.; BALIEIRO, J. C. C.; BRANDAO, F. Z.; TONATO, F.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORTUGAL, J. A. B.; GARCIA, A. R. Thermal comfort of Nelore (Bos indicus) and Canchim (*Bos taurus* x *Bos indicus*) bulls kept in an integrated crop-livestock-forestry system in a tropical climate. **Agricultural Systems**, v. 209, p. 103687, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103687.

ROSSING, W.; HOGEWERF, P. H.; IPEMA, A. H.; KETELAAR-DE LAUWERE, C. C.; DE KONING, C. J. A. M. Robotic milking in dairy farming. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 45, n. 1, p. 15-31, 1997. DOI: http://doi.org/10.18174/njas.v45i1.523.

SILVI, R.; PEREIRA, L. G. R.; PAIVA, C. A. V.; TOMICH, T. R.; TEIXEIRA, V. A.; SACRAMENTO, J. P.; DÓREA, J. R. R. Adoption of precision technologies by Brazilian dairy farms: the farmer's perception. **Animals**, v. 11, n. 12, p. 3488, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/ani11123488.

SVENNERSTEN-SJAUNJA, K. M.; PETTERSSON, G. Pros and cons of automatic milking in Europe. **Journal of Animal Science**, v. 86, p. 37-46, 2008. DOI: http://doi.org/10.2527/jas.2007-0527.

TSOUROS, D. C.; BIBI, S.; SARIGIANNIDIS, P. G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. **Information**

(Basel), v. 10, n. 11, p. 349, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/info10110349.

VALENTE, D. S. M.; MOMIN, A.; GRIFT, T.; HANSEN, A. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 168, p. 105142, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105142.

VILELA, R. A.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; JACINTO, M. A. C.; BARBOSA, A. V. C.; PANTOJA, M. H. A.; OLIVEIRA, C. M. C.; GARCIA, A. R. Dynamics of thermolysis and skin microstructure in water buffaloes reared in humid tropical climate: a microscopic and thermographic study. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, p. 871206, 2022. DOI: http://doi.org/10.3389/fvets.2022.871206.

ZAFALON, L. F.; SANTANA, R. C. M.; SANTOS, M. V.; ALVES, T. C.; GARCIA, A. R.; NICIURA, S. C. M.; CARACUSCHANSKI, F. D. Use of infrared thermography for predicting the infectious etiology of subclinical bovine mastitis in a robotic milking system using machine learning. In: ANNUAL MEETING OF THE EUROPEAN FEDERATION ON ANIMAL SCIENCE, 75., 2024, Florence. **Book of abstracts** [...]. Roma: European Federation of Animal Science, 2024. p. 367.

Capítulo 5

Microclima

José Ricardo Macedo Pezzopane, Cristiam Bosi, Henrique Bauab Brunetti, Rolando Pasquini Neto, Alexandre Rossetto Garcia, Jorge Lulu, Alberto Carlos de Campos Bernardi



RESUMO: Em decorrência das modificações ambientais promovidas pelos sistemas integrados de produção pecuária, especialmente pela presença do componente arbóreo, as interações microclimáticas têm sido objeto de investigação nos experimentos conduzidos pela Embrapa Pecuária Sudeste. Considerando a característica de cobertura descontínua das árvores dispostas em renques nesses sistemas, o monitoramento microclimático tem sido realizado ao longo de transectos perpendiculares às linhas de plantio. Elementos meteorológicos como radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, temperatura de globo negro, além da umidade do solo, foram monitorados de forma contínua em diferentes fases de manejo dos experimentos, por meio de sensores acoplados a registradores automáticos de dados. A transmissão da radiação fotossinteticamente ativa variou entre 91,6% a 36,4% no sistema silvipastoril com árvores nativas e entre 74,9% a 51,9% no sistema silvipastoril com eucalipto, em função do crescimento das árvores e desbastes realizados nos sistemas. A análise das interações microclimáticas ao longo dos anos possibilitou quantificar os efeitos das alterações ambientais sobre a produção de forragem e de culturas agrícolas, o conforto térmico animal, processos biológicos do solo e a abundância de macrofauna edáfica. Além disso, os resultados subsidiaram recomendações de manejo do componente arbóreo com vistas à maximização da produção de forragem em sistemas silvipastoris, com a determinação de 8 m^2 ha^{-1} de área basal das árvores como indicador de manejo de desbaste. Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos a partir dessas pesquisas.

Palavras-chave: Radiação Solar; Mudança Climática; Competição; Manejo; Conforto Térmico Animal; Agrometeorologia.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-5

ABSTRACT: Due to the environmental modifications inherent to integrated livestock production systems, particularly the presence of the tree component, microclimatic interactions have become a primary focus of investigations conducted by Embrapa Pecuária Sudeste. Given the discontinuous canopy coverage characteristic of trees arranged in rows within these systems, microclimatic monitoring has been executed along transects perpendicular to the planting lines. Meteorological elements, including solar radiation, wind speed, air temperature, relative humidity, black globe temperature, and soil moisture, were continuously monitored across the different management phases of the experiments using sensors coupled to automatic data loggers. The transmission of Photosynthetically Active Radiation (PAR) ranged from 91.6% to 36.4% in the silvopastoral system featuring native trees and from 74.9% to 51.9% in the silvopastoral system utilizing eucalyptus, with variations attributed to tree growth and thinning intensity. Analysis of these microclimatic interactions over the years enabled quantification of the effects of environmental change on forage and agricultural crop production, animal thermal comfort, soil biological processes, and the abundance of edaphic macrofauna. Furthermore, the findings substantiated recommendations for tree management aimed at maximizing forage production in silvopastoral systems, with $8 m^2 ha^{-1}$ of tree basal area identified as a key indicator for thinning management decisions. This chapter presents the principal outcomes derived from this research.
Keywords: Solar Radiation; Climate Change; Competition; Management; Animal Thermal Comfort; Agrometeorology.

5.1 INTRODUÇÃO

A pecuária voltada para a produção de gado de corte e leite no Brasil é majoritariamente desenvolvida em áreas de pastagens, configurando uma atividade econômica de grande relevância para o país (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne, 2024). Devido às variações climáticas entre as distintas regiões produtoras, o clima representa fator determinante para a produtividade animal, influenciando tanto o crescimento das forragens quanto o desempenho zootécnico dos rebanhos (Joele et al., 2016; Barbero, et al., 2021). Nesse contexto, os sistemas silvipastoris (SSPs), que integram árvores ao componente forrageiro, despontam como alternativas promissoras diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Os SSPs podem ser estruturados com distintas combinações de espécies arbóreas, nativas ou exóticas, em variados arranjos espaciais e densidades de plantio, oferecendo uma ampla gama de possibilidades de desenho. A configuração adotada influencia diretamente o microclima local, principalmente por meio da modulação da transmissão da radiação solar pelas copas das árvores. Associado ao efeito de quebra-vento, a redução da transmissão da radiação solar promove alterações nos padrões do balanço de energia, alterando os fluxos de calor latente e sensível no ambiente (Brenner, 1996). A magnitude dessas alterações é impactada diretamente em função das características da cobertura, sendo a variabilidade espacial dessas modificações um aspecto relevante, condicionada tanto pela hora do dia quanto pela estação do ano (Silva-Pando et al., 2002; Baliscei et al., 2013; Silva; Maia, 2013; Garcia et al., 2023).

As mudanças microclimáticas promovidas pelos SSPs resultam em alterações nos padrões de produção e no valor nutritivo das pastagens, além de proporcionarem benefícios aos animais, como a melhoria do conforto térmico (Giro et al., 2019). O planejamento e o manejo adequados desses sistemas devem, portanto, buscar sinergias decorrentes da presença do componente arbóreo, com o objetivo de maximizar os benefícios e minimizar possíveis efeitos negativos, como a competição por recursos entre árvores e pastagens.

A quantificação das alterações nas condições microclimáticas e seus efeitos sobre o potencial produtivo das forragens e o desempenho dos animais tem sido objeto de estudos científicos nas últimas décadas, especialmente em regiões tropicais. O conhecimento dessas interações é essencial para que práticas de manejo voltadas à intensificação sustentável e à conservação ambiental possam ser recomendadas com segurança e eficácia aos produtores rurais.

Considerando esse cenário, as pesquisas da Embrapa Pecuária Sudeste conduzidas nos experimentos de longa duração (ILPF-corte, ILPF-Leite e SSP-Nativas) têm como objetivo quantificar alterações microclimáticas e hídricas no solo dos sistemas de produção pecuária que incorporam o componente arbóreo. O conhecimento das interações que ocorrem no ambiente permitiu inferir sobre o efeito do componente arbóreo na produção de forragem e culturas anuais (Pezzopane et al., 2019a, 2020), no conforto térmico e

bem-estar animal (Pezzopane et al., 2019b; Giro et al., 2019; Lemes, et al., 2021; Romanello et al., 2023), na ocorrência de macrofauna do solo e parasitas bovinos (Oliveira et al., 2017, Gusmão et al., 2020; Bruz et al., 2023) e nas características de degradação e qualidade da matéria orgânica do solo (Bieluczyk et al., 2020; Bessi et al, 2024). Os resultados apresentados neste capítulo visam subsidiar o aprimoramento do planejamento e do manejo desses sistemas silvipastoris.

5.2 MEDIDAS MICROCLIMÁTICAS

5.2.1 Protocolos de medição

A caracterização microclimática nos experimentos de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste tem sido realizada de maneira contínua, com o uso de sensores acoplados a registradores automáticos de dados, permitindo a análise espaço-temporal do microclima em função das mudanças sazonais e da evolução interanual dos sistemas. A Figura 5.1 apresenta imagens das estações meteorológicas utilizadas, com sensores de temperatura e umidade relativa do ar (termo-higrômetros HC2-S3; Rotronic, Bassersdorf, Switzerland), velocidade do vento (anemômetros ultrassônicos bidirecionais Windsonic; Gill Instruments, Lymington, UK), temperatura do globo negro (termopares de cobre constantan SALCAS, Brasil) e radiômetros (quantômetros Apogee, Logan, UT, USA) no sistema de produção a pleno sol (Figura 5.1A), sistema ILPF-corte (Figura 5.1B), sistema ILPF-Leite (Figura 5.1C) e sistema SSP-Nativas (Figura 5.1D), com detalhes do acoplamento dos sensores nos registradores automáticos de dados (CR1000 e CR3000, Campbell, USA) (Figuras 5.1A e 5.1C). O monitoramento da umidade do solo foi realizado com sonda capacitiva (Diviner 2000, Sentek Pty Ltd., Stepney, SA, Austrália), até 1 metro de profundidade, com leituras a cada 10 centímetros.

Nos sistemas de produção que incluem o componente arbóreo (SSP-Nativas, ILPF-corte e ILPF-Leite; ver detalhes no Capítulo 3), as árvores estão dispostas em renques, com linhas simples ou triplas. Nesses casos, os sensores meteorológicos foram posicionados em linhas transversais (transectos) ao renque de árvores, com pelo menos um ponto de medição sob a copa e outro no centro do entrerrenque. Em diversos projetos, especialmente para sensores que quantificam a inci-

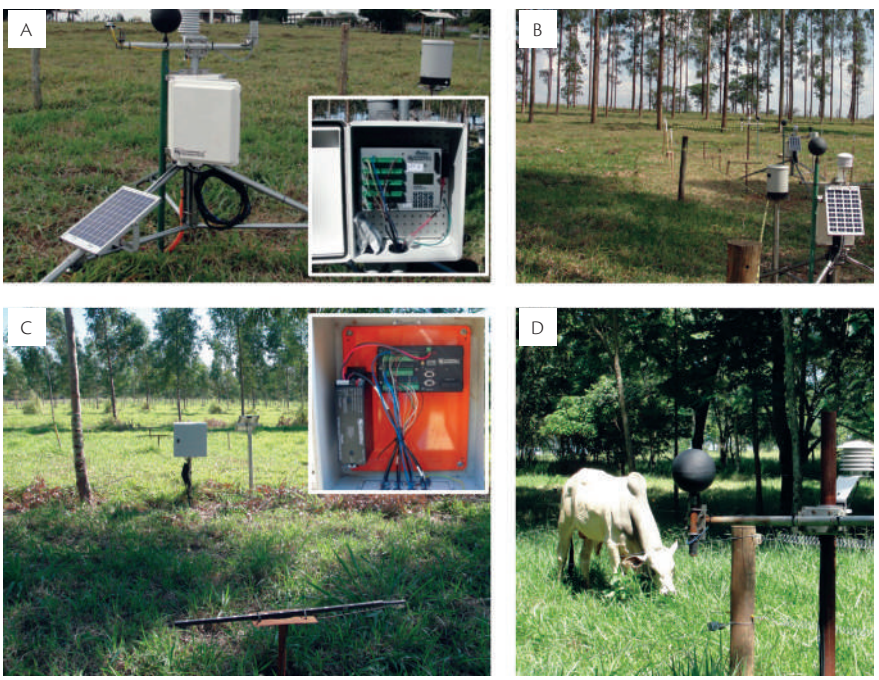


Foto: José Ricardo Macedo Pezzopane

Figura 5.1. Imagens de estações meteorológicas instaladas em pastagem a pleno sol (A); e nos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) (B); integração lavoura-pecuária-floresta-leite (ILPF-Leite) (C); e SSP-Nativas (D) na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP.

dência de radiação solar e para a determinação do teor de água no solo, as medições são realizadas em mais pontos equidistantes entre dois renques de árvores, com o objetivo de caracterizar a variabilidade espacial dos elementos microclimáticos (Pezzopane et al., 2015; Bosi et al., 2020a).

A Figura 5.2 apresenta um croqui desse padrão de medição. No sistema ILPF-corte, por exemplo, nas Fases 1 e 2 (*ver* Capítulo 3), o espaçamento entre as linhas de árvores era de 15 metros. Com a realização do segundo desbaste e o início da Fase 3 do experimento, o espaçamento passou para 30 metros, o que exigiu a readequação do padrão de instalação dos transectos de medição.

Além das medidas com sensores instalados em estações meteorológicas, a caracterização microclimática dos sistemas, especialmente a temperatura de superfície, também pôde ser realizada por sensoriamento remoto. Nas áreas experimentais da Embrapa Pecuária Sudeste, foram desenvolvidas pesquisas para a determinação da temperatura de superfície com o uso de sensores de infravermelho embarcados em aeronaves pilotadas ou através de imagens de satélites (Garcia et al., 2023, Pezzopane et al., 2023) (*ver* Capítulo 15).

5.2.2 Caracterização microclimática: SSP-Nativas

Durante 14 anos (entre 2010 e 2023), as medições microclimáticas foram realizadas no experimento SSP-Nativas, com resultados parciais dessa caracterização apresentados por Bosi et al. (2014), Pezzopane et al. (2015), Oliveira et al. (2017) e Pasquini Neto et al. (2024).

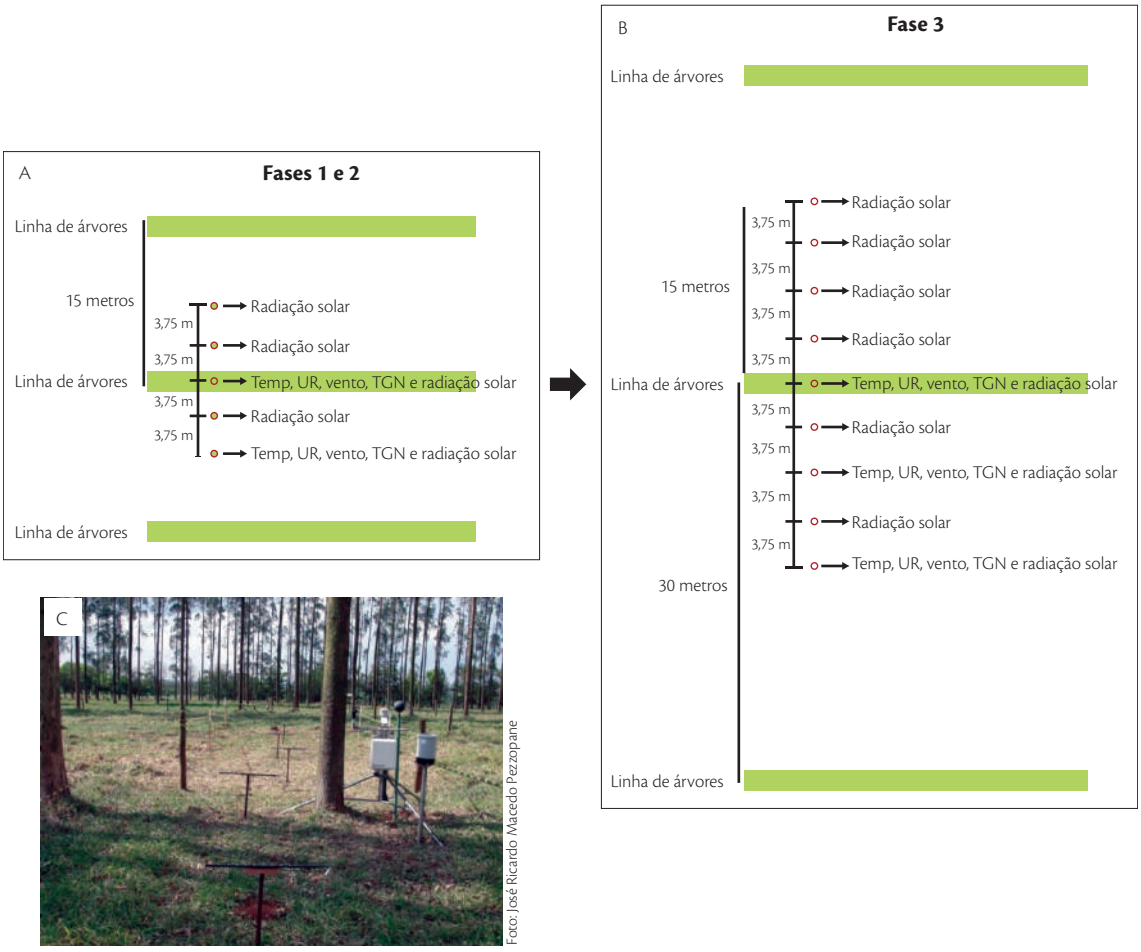


Figura 5.2. Croqui de instalação de sensores para o monitoramento microclimático no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) nas Fases 1 e 2 (A) e na Fase 3 (B), com foto no detalhe, em São Carlos-SP (C).

Na Figura 5.3 é apresentada a dinâmica da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no experimento SSP-Nativas entre os anos de 2010 e 2023. A variação estacional da transmissão foi influenciada pelo desenvolvimento das árvores e pelos desbastes relizados no sistema. Em função da orientação das linhas de árvores (Nordeste-Sudoeste), o padrão de transmissão não apresentou grandes variações ao longo do ano, com maiores transmissões nos meses de setembro e outubro em função do hábito caducifólio das espécies arbóreas, fazendo com que o final do inverno seja o período com menor quantidade de folhas nas árvores (Figura 5.3A). Na Fase 1, antes do desbaste, a trasmissão da RFA variou de 91,6% (2010/2011) a

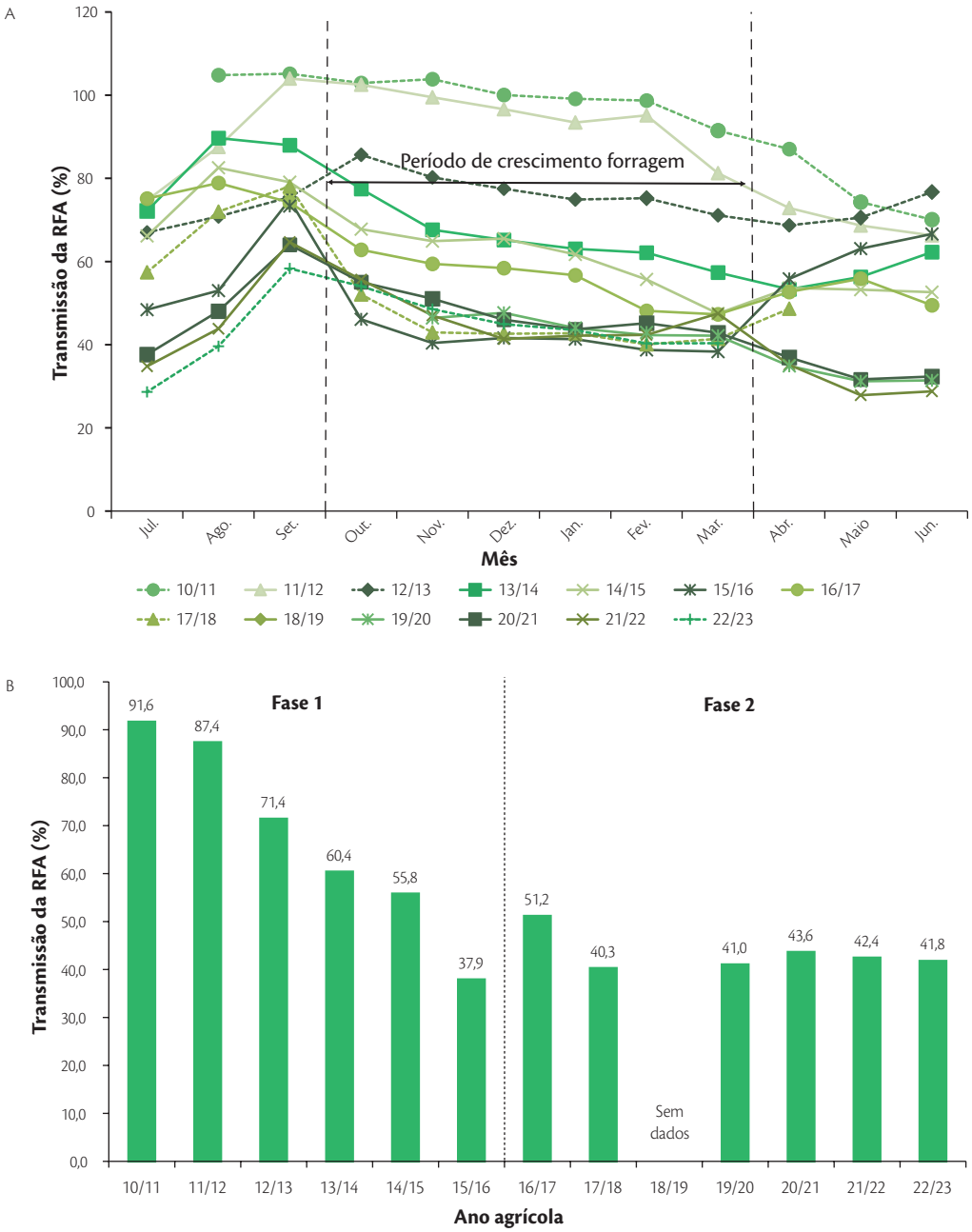


Figura 5.3. Variação mensal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (A) e valor médio da transmissão no período compreendido entre outubro e março (B) dos anos agrícolas de 2010/2011 a 2022/2023 no experimento SSP-Nativas em São Carlos-SP.

36,4% (2015/2016). Após o desbaste, ocorreu aumento da trasmissão para 51,2%, que foi diminuindo gradativamente até o último ano de medição, em 2022/2023, com 41,8% da transmissão da RFA (Figura 5.3B).

A presença das árvores também impactou em outros elementos meteorológicos, como a incidência de ventos, temperatura do ar e umidade. O efeito quebra-vento no sistema reduziu em média 59% da velocidade do vento no SSP-Nativas em comparação ao sistema a pleno sol (Figura 5.4A). Os efeitos também foram verificados na temperatura do ar (Figura 5.4B) e na temperatura de globo negro (Figura 5.4D), com redução média de 0,8 °C e 2,9 °C nos valores mensais, respectivamente. Essa redução na temperatura proporcionou menores valores de déficit de pressão de vapor (DPV) no sistema, com redução de 12% nos valores mensais.

Em função da característica descontínua da cobertura proporcionada pelas árvores no sistema, resultado do arranjo das árvores em renques, o ponto de medição sob a copa das árvores promoveu maiores diferenças microclimáticas ao sistema a pleno sol em comparação ao ponto de medição no meio do entrerrenque de árvores.

5.2.3 Caracterização microclimática: integração lavoura-pecuária-floresta-corte

Durante o período de 2013 a 2024, a caracterização microclimática foi realizada no experimento ILPF-Corte, com resultados parciais apresentados por Bosi et al. (2020a), Pezzopane et al. (2021, 2024a) e Brunetti et al. (2025).

A Figura 5.5 apresenta a dinâmica da transmissão da RFA no experimento ILPF-Corte no período entre 2013 e 2024. A variação estacional da transmissão foi influenciada pela época do ano, pelo desenvolvimento das árvores e pelos desbastes realizados no sistema. Em função da orientação das linhas de árvores (Leste-Oeste), os maiores valores de transmissão ocorreram

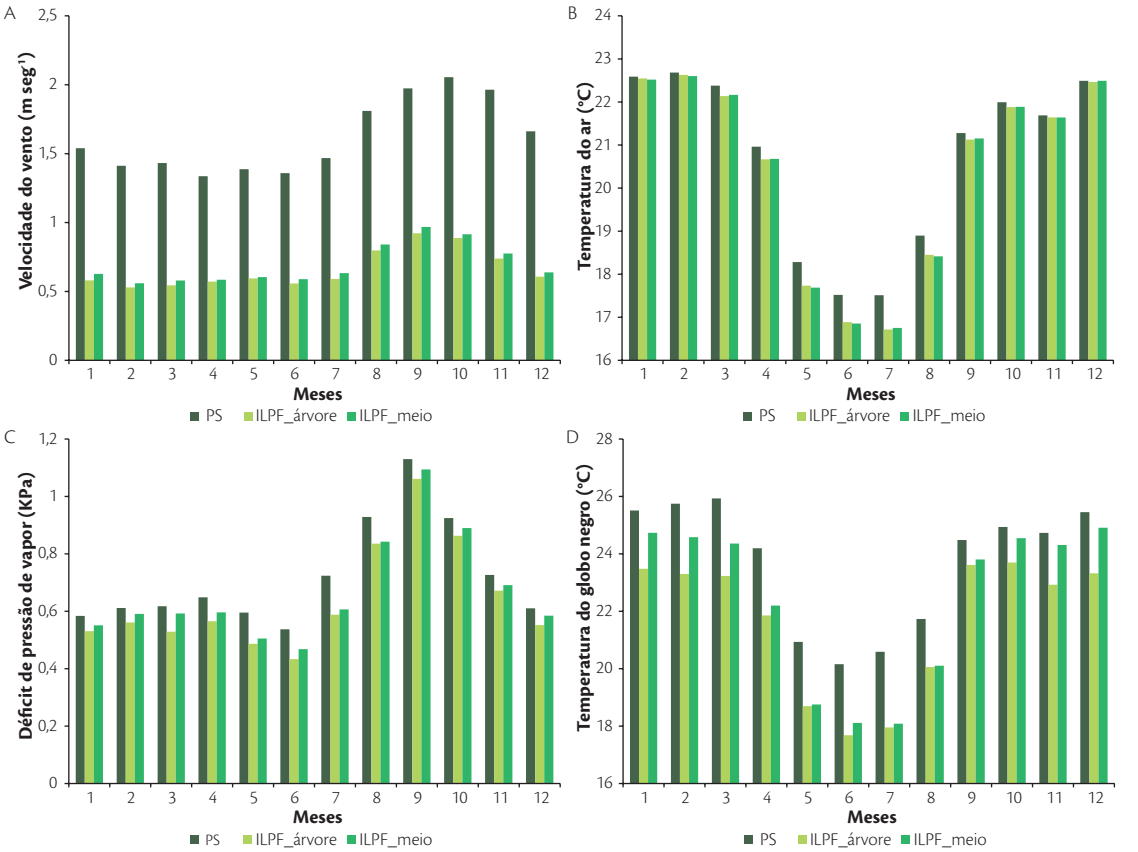


Figura 5.4. Variação mensal da velocidade do vento (A); da temperatura do ar (B); da temperatura do globo negro (C); e do déficit de pressão de vapor (D) na pastagem a pleno sol e em dois pontos (sob a copa e no meio do entrerrenque) no sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) entre 2014 e 2024 em São Carlos-SP.

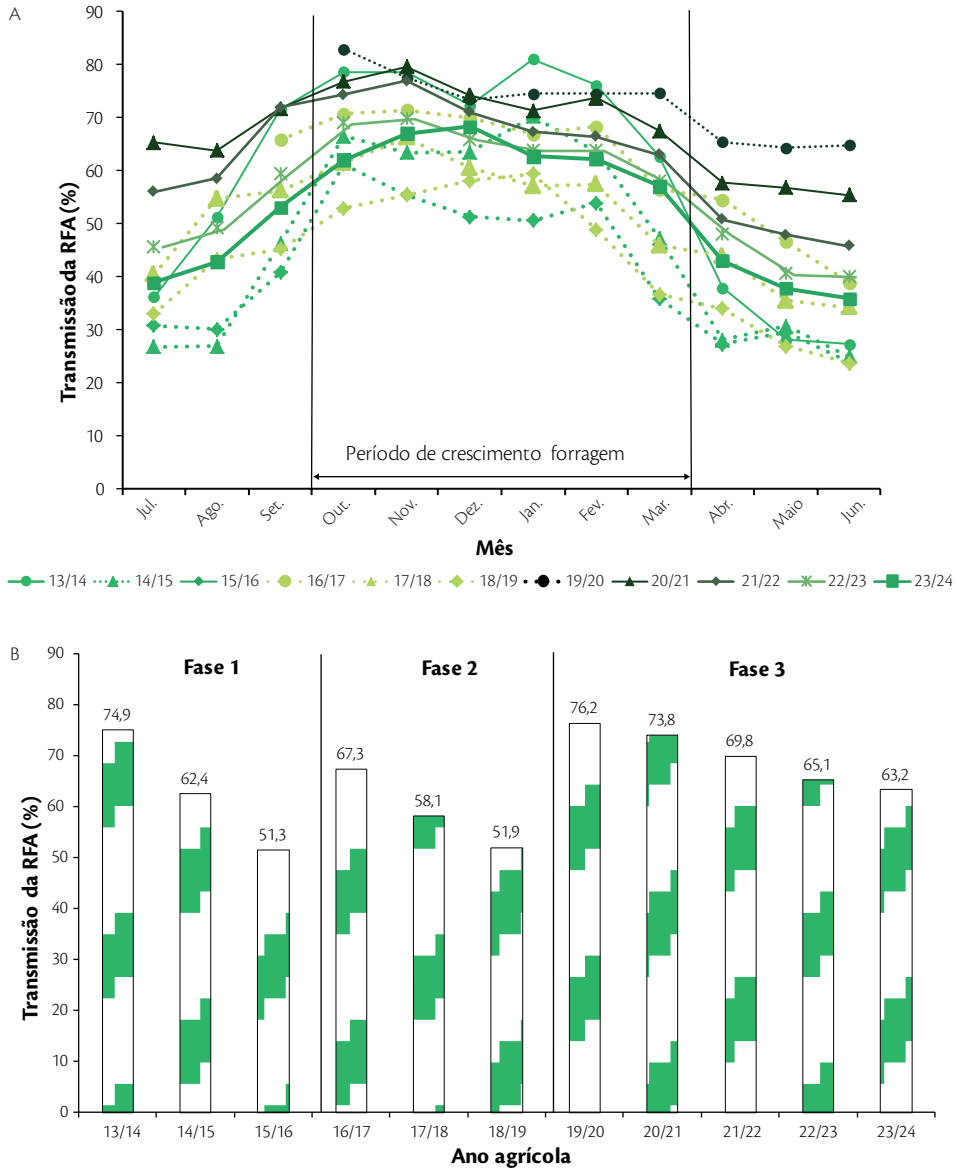


Figura 5.5. Variação mensal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (A) e valor médio da transmissão da RFA (B) no período compreendido entre outubro e março dos anos agrícolas de 2013/2014 a 2023/2024 no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) em São Carlos-SP.

na primavera e no verão. No período de crescimento mais significativo da pastagem (outubro a março), as transmissões médias anuais variaram de 74,9% a 51,3% na Fase 1, de 67,3% a 51,9% na Fase 2 e de 76,2% a 63,2% na Fase 3, evidenciando o efeito do desbate na transmissão da RFA, especialmente da Fase 2 para a Fase 3, quando o espaçamento entre linhas de árvores no sistema passou de 15 metros para 30 metros.

Devido ao arranjo das árvores em linhas no sistema silvipastoril, ocorreu uma variabilidade espaço-temporal da transmissão da RFA (Figura 5.6) (Pezzopane et al., 2024a). Nas estações de primavera e verão, as menores transmissões ocorreram próximo ao renque das árvores, enquanto nas estações de outono e inverno, as menores transmissões de RFA ocorreram na maior parte do sistema silvipastoril, em função da orientação das linhas de árvores (Leste-Oeste) e do movimento aparente do sol. Após os desbastes ocorridos em 2016 (Fase 1 para Fase 2) e 2019 (Fase 2 para Fase 3), ocorreu um aumento na transmissão da RFA,

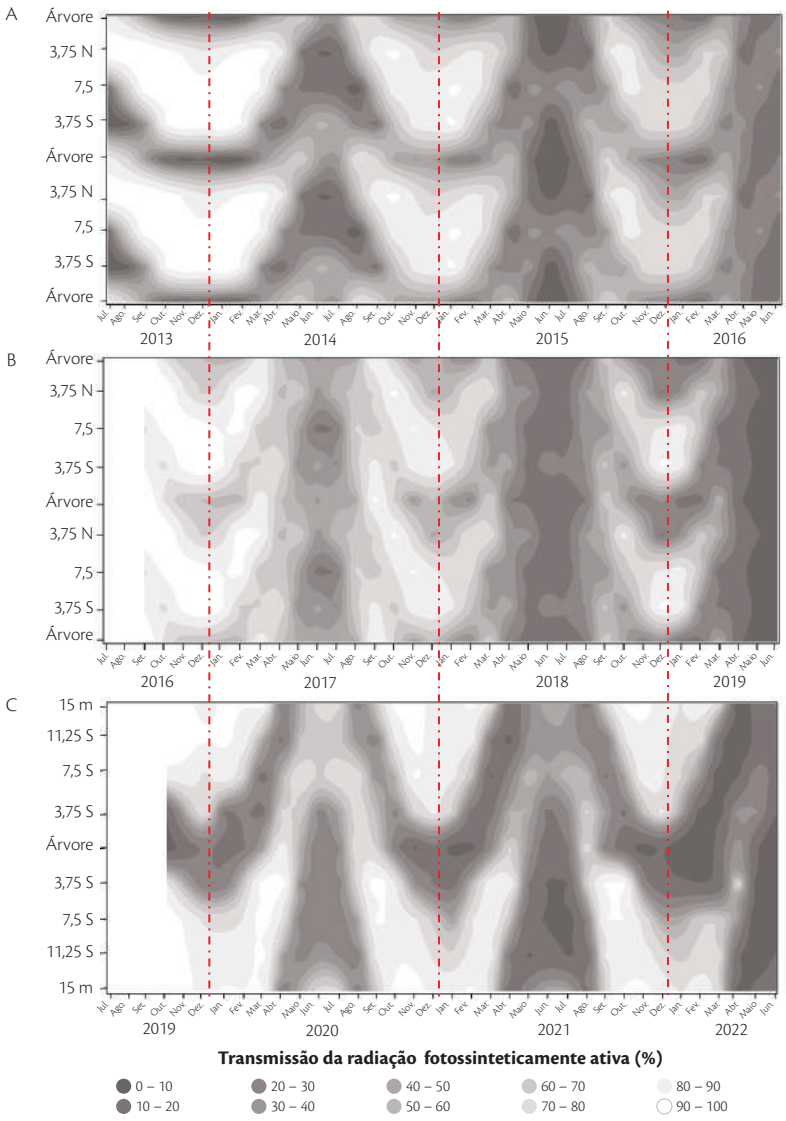


Figura 5.6. Variabilidade espaço-temporal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no experiment integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte), durante os períodos de 2013 a 2016 (A); 2016 a 2019 (B); e 2019 a 2022 (C). Interpolação feita pelo método do vizinho mais próximo.
Fonte: Pezzopane et al. (2024a).

com ênfase para as estações de primavera e verão. Nas Fases 2 (Figura 5.6B) e 3 (Figura 5.6C), assim como já tinha ocorrido na Fase 1 (Figura 5.6A), foi verificada redução progressiva na transmissão da RFA com o passar dos anos (Figura 5.5).

Assim como no experimento SSP-Nativas, também foram observadas alterações em outros elementos meteorológicos, com redução na incidência dos ventos de 22% em média (Figura 5.7A). O valor obtido da redução, que levou em consideração os valores após desbastes, foi menor que o encontrado por Bosi et al. (2020a), que alcançou valores próximos a 50% na Fase 1 do sistema. Para a temperatura do ar (Figura 5.7B) e a temperatura de globo negro (Figura 5.7D), as reduções médias mensais foram de 0,1 °C e 0,8 °C, respectivamente. A combinação da redução da transmissão da RFA e da temperatura proporcionou reduções no déficit de pressão de vapor (DPV) de 3,3% nos valores médios mensais, atingindo em alguns meses 9% de redução (Figura 5.7C).

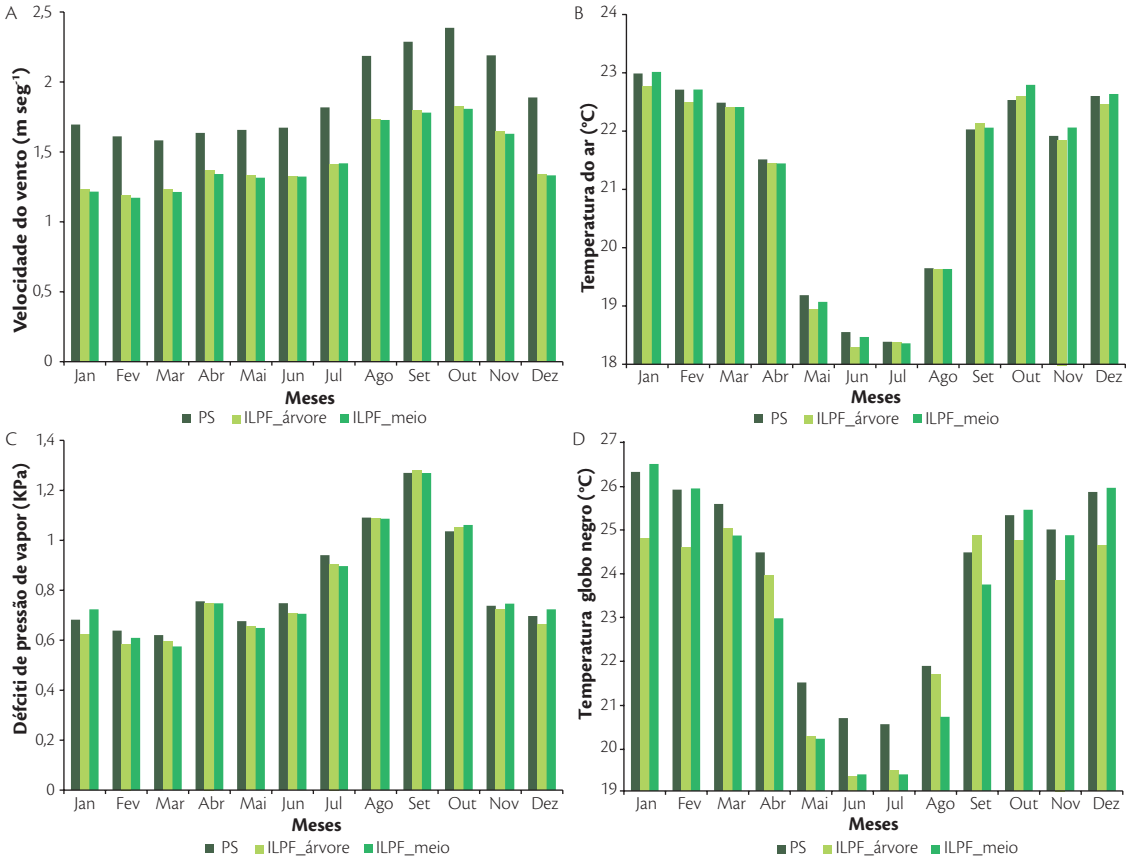


Figura 5.7. Variação mensal da velocidade do vento (A); da temperatura do ar (B); da temperatura do globo negro (C); e do déficit de pressão de vapor (D) na pastagem a pleno sol (PS) e em dois pontos (sob a copa, ILPF_árvore e no meio do entrerrenque, ILPF_meio) no sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) entre 2014 e 2024 em São Carlos-SP.

5.2.4 Índices de conforto térmico animal

No ambiente tropical, os cenários de mudanças climáticas representam desafios à produção pecuária. A ocorrência de ondas de calor, que acarretam aumentos na frequência e nos valores de temperaturas elevadas (Marengo et al., 2009), pode prejudicar o metabolismo, o comportamento e, em última análise, o desempenho dos animais. Nesse sentido, SSPs têm sido apontados como estratégias de adaptação a esses desafios (Silva et al., 2011; Lemes et al., 2021).

A relação entre as características do ambiente de conforto animal é expressa por meio de índices que podem quantificar o quão o ambiente está adequado para o bem-estar animal. Dentre diversos indicadores de interesse, índices como a carga térmica radiante (CTR) (Esmay, 1978) e o índice de temperatura do globo negro e umidade (ITGU) (Buffington et al., 1981) têm sido utilizados para esse fim. Ambos os índices utilizam em seu modelo a temperatura do globo negro, combinando, de forma direta ou indireta, os efeitos da temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento sobre os animais (Kelly; Bond, 1971).

Os índices ITGU e CTR são gerados a partir de quantificações dos elementos meteorológicos. O ITGU é calculado a partir da Equação 5.1:

$$ITGU = tgn + 0{,}36tpo + 41{,}5 \quad (5.1)$$

em que tgn é a temperatura de globo negro (°C), e tpo é a temperatura do ponto de orvalho (°C).

A carga térmica radiante (CTR) é calculada a partir das Equações 5.2 e 5.3:

$$CTR = \sigma \cdot (MRT^4) \quad (5.2)$$

$$MRT = 100 \cdot 4\sqrt{2{,}51 \cdot u^{0{,}5} \cdot ((tgn+273)-(temp+273)) + \frac{((tgn+273))^4}{100}} \quad (5.3)$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, 5,67 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4}); MRT é a temperatura média radiante

(K); *u* é a velocidade do vento (m s^{-1}) e *temp* é a temperatura do ar (ºC).

Nas áreas experimentais da Embrapa Pecuária Sudeste, a partir das medições microclimáticas (item 5.2.1), os índices de conforto térmico animal têm sido caracterizados nos sistemas de produção visando verificar sua relação com parâmetros obtidos nos animais conduzidos nesses experimentos (Lemes, et al., 2021; Romanello et al., 2023).

Pezzopane et al. (2019b) realizaram amplo trabalho com quantificação dos índices CTR e ITGU nos experimentos ILPF-Corte e SSP-Nativas, e uma síntese dos resultados obtidos está expressa na Figura 5.8. Os dois sistemas arborizados (SSP-Nativas e ILPF-Corte) reduziram a carga térmica radiante sobre os animais. Na média horária de todo o período experimental, os valores de CTR no experimento SSP-Nativas (Figura 5.8A) atingiram cerca de 700 W m^{-2} nas horas centrais do dia no sistema a pleno sol, seguido pelo ponto SSP-Nativas_meio (meio do entrerrenque, Figura 5.2), que atingiu 680 W m^{-2} próximo ao meio-dia. Já em SSP-Nativas_arvore, os valores atingiram 550 W m^{-2} próximo das 14 h. Já no experimento ILPF-Corte (Figura 5.8B), considerando a média horária durante todo o período experimental avaliado, os valores máximos de CTR no sistema a pleno sol atingiram cerca de 700 W m^{-2} nas horas centrais do dia, seguido pelo ponto ILPF-Corte_meio com 620 W m^{-2} próximo ao meio-dia e 600 W m^{-2} no mesmo horário no ponto de avaliação próximo às árvores.

Com relação ao índice ITGU, Pezzopane et al. (2019b) determinaram que no SSP-Nativas, considerando todo o período experimental (Figura 5.8C), no ponto de avaliação SSP-Nativas_meio, no período da manhã, onde ocorreu elevada transmissão de RFA pelas árvores, os valores de ITGU foram maiores que na pastagem a pleno sol, e no ponto de avaliação sob as árvores os valores de ITGU se mantiveram abaixo do ITGU no sistema a pleno sol. A partir das 14 h, os dois pontos do sistema silvipastoril se mantiveram

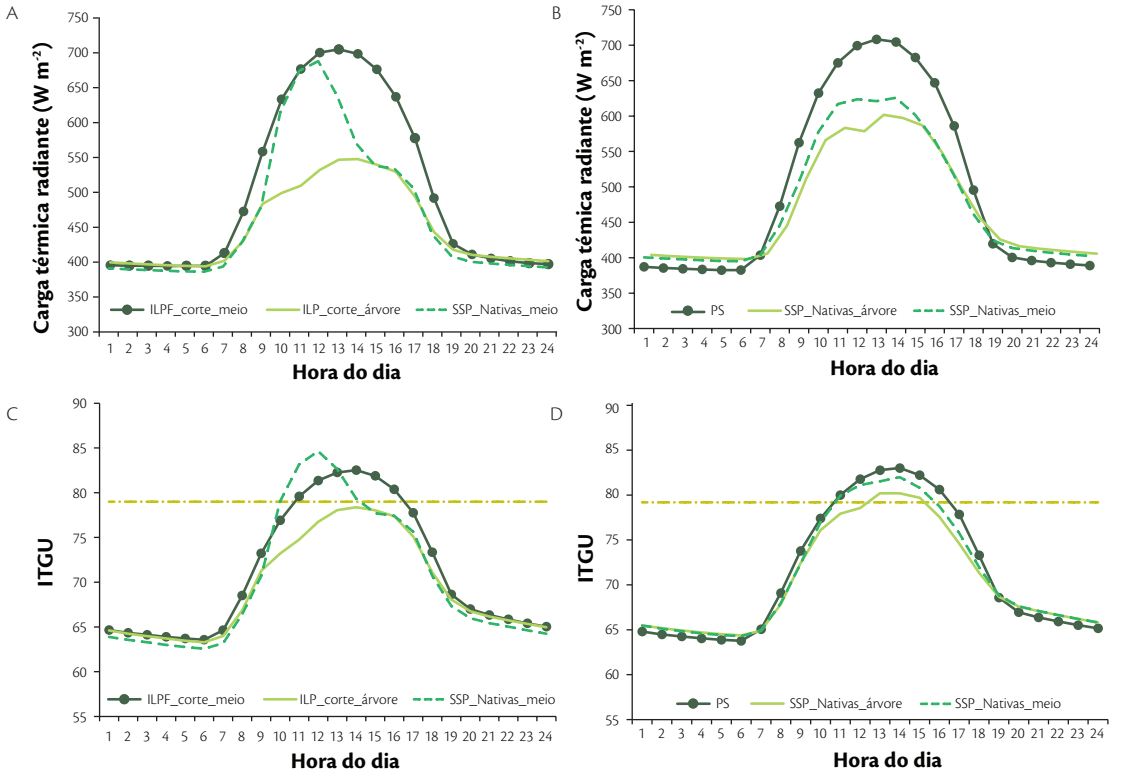


Figura 5.8. Valores médios horários do índice de conforto da carga témica radiante (A e B) e índice de temperatura do globo negro e umidade (ITGU) (C e D) na pastagem a pleno sol (PS) e nos sistemas silvipatoril com espécies árbóreas nativas (SSP-Nativas) e com eucaliptos integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte), respectivamente, em São Carlos-SP.
Fonte: Pezzopane et al. (2019b).

semelhantes, com valores de ITGU abaixo de 79. Já no experimento ILPF-Corte (Figura 5.8D), os dois pontos de medida no sistema SSP permaneceram com valores menores que o sistema a pleno sol ao longo do dia.

Ambos os sistemas promoveram redução significativa no número de horas com ITGU<79, considerado como limiar para manifestação inicial de estresse térmico aos bovinos (Baeta, 1985; Baeta; Souza, 2010). Essa redução variou nos sistemas ao longo das estações do ano e nos dois pontos avaliados, o que, segundo Pezzopane et al. (2020), ocorreu em função do tipo de copa das árvores e orientação dos renques.

Uma constatação relevante do trabalho apresentado por Pezzopane et al. (2019b) foi a capacidade dos sistemas silvipastoris em promover a adaptação do sistema de produção pecuário aos cenários de mudanças climáticas relacionados ao aumento da temperatura do ar. No SSP-Nativas, os valores de ITGU ultrapassaram 79 (início de estresse), quando a temperatura do ar na estação meteorológica padrão foi de 27,1 °C, enquanto na pastagem a pleno sol esse valor foi de 24,9 °C. No ILPF-Corte, o ITGU atingiu 79 quando a temperatura do ar na estação meteorológica padrão foi de 26 °C, enquanto a pleno sol esse limite foi atingido com 24,8 °C. Esses dados mostraram a capacidade dos sistemas SSP-Nativas e ILPF-Corte em manter o conforto, com acréscimos de até 2,2 °C e 1,2 °C, respectivamente, na temperatura média nas condições vigentes.

5.2.5 Umidade do solo

Os teores de água no solo em sistemas pastoris ou agrícolas com a presença dos renques de árvores sofreram alterações em função da distância das árvores nos sistemas SSP-Nativas e ILPF-Corte. Essas constatações foram obtidas por Pezzopane et al. (2015), Bosi et al. (2020b) e Bieluczyk et al. (2023).

Ao avaliarem episódios de retirada de água no solo após a ocorrência de eventos de chuvas volumosas, Pezzopane et al. (2015) e Bosi et al. (2020b), nos sistemas SSP-Nativas e ILPF-Corte, respectivamente, identificaram padrões semelhantes, com maior consumo de água nos pontos de observação próximos ao renque de árvores, especialmente em profundidades maiores, devido à extração de água pelas árvores.

Resultados semelhantes foram obtidos por Bieluczyk et al. (2023), ao avaliarem a umidade do solo na fase lavoura e posteriormente de pastagem no sistema ILPF-Corte. Os autores observaram menores valores de água disponível no solo nas proximidades das árvores, evidenciando um gradiente entre renques (distâncias de 1,9 < 4,3 < 7,5 m), especialmente na estação seca, enquanto nas estações chuvosas os valores foram, em sua maioria, semelhantes.

Por outro lado, nas camadas superficiais, Bosi et al. (2020b) identificaram menor consumo de água em relação ao sistema de pastagem a pleno sol e nos pontos próximos ao renque das árvores, em função dos efeitos de sombreamento e quebra-vento (Figuras 5.3 e 5.4) sobre a evapotranspiração das forrageiras.

Outra constatação interessante obtida por Bosi et al. (2020b) no sistema ILPF-Corte, onde havia árvores de eucalipto, foi em relação aos episódios de recarga de água. Durante o período chuvoso, segundo esses autores, a recarga hídrica do solo foi maior nas proximidades das árvores, como resultado da elevada interceptação de água pelas copas e sua posterior deposição no solo, promovendo maior aumento da umidade do solo nesses pontos de amostragem.

5.2.6. Crescimento das árvores e transmissão da radiação fotossinteticamente ativa em SSPs: uma abordagem para manejo de desbaste

A partir do monitoramento contínuo do crescimento das árvores e da transmissão de RFA em sistemas silvipastoris, Pezzopane et al. (2024b) estabeleceram a relação entre essas variáveis visando à recomendação de manejo das árvores no sistema para maximizar a produção de forragem em SSPs.

O trabalho foi realizado considerando o componente arbóreo de espécies de eucalipto. Para o desenvolvimento do trabalho, foram considerados dados de transmissão da RFA nos experimentos de ILPF-Corte e ILPF-Leite, conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, além de experimentos conduzidos em Campo Grande-MS. Esse conjunto de dados permitiu o estabelecimento de relações a partir de sistemas com densidade de árvores que variou de 83 a 357 árvores por hectare, em função dos diferentes estágios de desenvolvimento dos sistemas. Para a realização do estudo, os autores selecionaram diversas variáveis dendrométricas obtidas nos experimentos, tendo sido observada maior correlação entre a transmissão da RFA e a área basal, definida a partir da soma das áreas seccionais do tronco à altura do diametro à altura do peito (DAP = 1,3 m) (Figura 5.6).

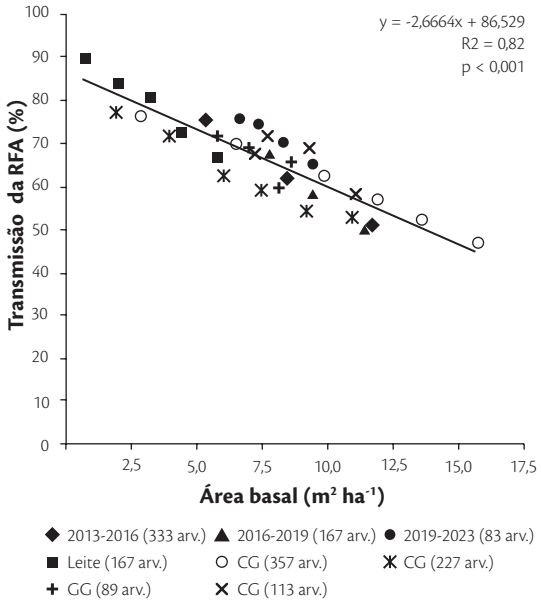


Figura 5.9. Relação média entre área basal (m^2 ha^{-1}) e transmissão da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no período de outubro a março para os sistemas silvipastoris com eucalipto conduzidos em São Carlos-SP (CPPSE) e Campo Grande, MS (CNPGC), Brasil, com 333 árvores ha^{-1} (CPPSE_Corte_333), 167 árvores ha^{-1} (CPPSE_Corte_167), 83 árvores ha^{-1} (CPPSE_Corte_83), 167 árvores ha^{-1} (CPPSE_Leite_167), 357 árvores ha^{-1} (CNPGC_Corte_357) e 222 árvores ha^{-1} (CNPGC_Corte_222).
Fonte: Pezzopane et al. (2024b).

Em sistemas silvipastoris, as informações obtidas entre a área basal e a transmissão da RFA podem auxiliar na manutenção de níveis adequados de transmissão por meio do manejo florestal, como o desbaste. Isso porque as forrageiras tropicais toleram níveis de sombreamento ao redor de 35% (Paciullo et al., 2011; Pezzopane et al., 2020), com pouco efeito na quantidade de forragem produzida no sistema. Nesse sentido, com as informações obtidas por Pezzopane et al. (2024b) (Figura 5.9), foi determinado o valor de área basal ao redor de 8 m^2 ha^{-1} como indicador de necessidade de manejo por desbaste visando à manutenção do potencial produtivo da pastagem.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da caracterização microclimática realizada em experimentos de longa duração em sistemas de ILPF evidenciam a influência da espécie arbórea, relacionada ao seu hábito de crescimento, além da densidade de plantio e orientação do renque nas alterações do ambiente sob a copa das árvores. A disposição das árvores em renques promoveu uma variabilidade espacial dos parâmetros microclimáticos, e a magnitude da influência sofreu alterações ao longo do desenvolvimento dos sistemas em função do manejo do componente arbóreo. Os sistemas silvipastoris, ao promoverem o aumento do conforto térmico animal, apresentam-se como alternativas de adaptação dos sistemas de produção pecuários aos cenários de mudanças climáticas.

Assim como nas características microclimáticas, nas avaliações de umidade do solo também foi identificada variabilidade espacial, com maior consumo de água próximo ao renque de árvores, enquanto nos pontos avaliados dos sistemas silvipastoris houve menor consumo em comparação à pastagem a pleno sol.

A medição do crescimento das árvores nos sistemas e a quantificação da transmissão da radiação solar fotossinteticamente ativa permitiram o estabelecimento de relações entre essas variáveis, as quais podem auxiliar no manejo do componente arbóreo nos SSPs para maximizar a produção de forragem nos sistemas.

5.4 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE. **Beef Report: perfil da pecuária no Brasil 2024**. Brasília: ABIEC, 2024. 106 p. E-book. Disponível em: https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/. Acesso em: 24 mar. 2025.

BAETA, F. C. **Responses of lactating dairy cows to the combined effects of temperature, humidity and wind velocity in the warm season**. 1985. Thesis (Ph.D.) – University of Missouri, Columbia.

BAETA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais**: conforto animal. Viçosa: Editora UFV. 2010.

BALISCEI, M. A.; BARBOSA, O. R.; SOUZA, W. D.; COSTA, M. A. T.; KRUTZMAN, A.; QUEIROZ, E. O. Microclimate without shade and silvopastoral system during summer and winter. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 35, n. 1, 2013. DOI: http://doi.org/10.4025/actascianimsci.v35i1.15155.

BARBERO, R. P.; RIBEIRO, A. C. C.; MOURA, A. M.; LONGHINI, V. Z.; MATTOS, T. F. A.; BARBERO, M. M. D. Potencial de produção de bovinos de corte em pastagens tropicais: revisão de literatura. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, n. e-69609, 2021. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-6891v22e-69609.

BESSI, D.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; TANAKA, M. O. Decomposition and stabilization of the organic matter in integrated livestock production systems. **Agroforestry**

Systems, v. 98, n. 7, p. 2275, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01044-0.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 371, p. 114368, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; GERMON, A.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; CAMARGO, P. B.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Fine root dynamics in a tropical integrated crop-livestock-forestry system. **Rhizosphere**, v. 26, p. 100695, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100695.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C.; SANTOS, P. M.; NICODEMO, M. L. F. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 6, p. 449-456, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000600006.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Silvopastoral system with Eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. e20180425, 2020a. DOI: http://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 429-440, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-019-00402-7.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers**, v. 24, p. 711-714, 1981. DOI: http://doi.org/10.13031/2013.34325.

BRENNER, A. J. Microclimatic modifications in agroforestry. In: ONG, C. K.; HUXLEY, P. (ed.). **Tree-crop interactions**: a physiological approach. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 159-188.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: Enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

BRUZ, L. S. M.; SANTOS, A.; DEMETRIO, W. C.; PRIMO, D. F.; FELICIANO, L. P.; FERNANDES, C. H.; BARTZ, M. L. C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BROWN, G. G. Earthworms in various agricultural and forest ecosystems in São Carlos-SP, Brazil. **Zootaxa**, v. 5255, n. 1, p. 324-335, 2023. DOI: http://doi.org/10.11646/zootaxa.5255.1.26.

ESMAY, M. L. **Principles of animal environment**. Westport: Avi Publishing, 1978.

GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; REDAELLI, V.; LUZI, F.; LAURENTI, N.; MENEGAZZO, L. P.; GRUDZINSKI, C. E.; SANTOS JUNIOR, P. C.; BARBOSA, A. V. C. Use of infrared thermography from a crewed aerial vehicle for remote sensing of tropical pasture areas with different levels of afforestation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 213, p. 108198, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108198.

GIRO, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BARIONI JUNIOR, W.; PEDROSO, A. F.; LEMES, A. P.; BOTTA, D.; ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. **The Science of the Total Environment**, v. 684, p. 587-596, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377.

GUSMÃO, M. R.; OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Insect richness in dung patches of cattle raised in two livestock systems. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 1, p. 9-17, 2020. DOI: http://doi.org/10.32404/rean.v7i1.4033.

JOELE, M.R.S.P.; LOURENÇO, L.F.H.; LOURENÇO JÚNIOR, J.B.; ARAUJO, G.S.; BUDEL, J.C.C.; GARCIA, A.R. Meat Quality of Buffaloes Finished in Traditional or Silvopastoral System in the Brazilian Eastern Amazon. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, p. 1740-1745, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.7922.

KELLY, C.; BOND, T. E. Bioclimatic factors and their measurement. In: National Academic of Sciences (ed.). **A guide to environmental research on animals**. Washington: National Academic of Sciences, 1971. p. 71-92.

LEMES, A.; GARCIA, A. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRANDÃO, F. Z.; WATANABE, Y. F.; COOKE, R. F.; SPONCHIADO, M.; DE PAZ, C. C. P.; CAMPLESI, A. C.; BINELLI, M.; GIMENES, L. U. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 14092, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s41598-021-93609-7.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009. DOI: http://doi.org/10.1002/joc.1863.

OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; GUSMÃO, M. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BILHASSI, T. B.; SANTANA, C. H.; GONÇALVES, T. C.; RABELO, M. D.; GIGLIOTI, R. Differential *Haematobia irritans* infestation levels in beef cattle raised in silvopastoral and conventional pasture systems. **Veterinary Parasitology**, v. 246, p. 96-99, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.08.020.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MÜLLER, M. D.; PIRES, M. F. Á.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n.

10, p. 1176-1183, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000009.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; DA SILVA, G. V.; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNETTI, H. B.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Forage accumulation and nutritive value in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Crop & Pasture Science**, v. 75, n. 5, p. 1, 2024. DOI: http://doi.org/10.1071/CP24043.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G.; PARMEJIANI, R. S. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Bragantia**, v. 74, p. 110-119, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-4499.0334.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 39–49, 2019a. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agrícola**, v. 77, n. 2, p. e20180150, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; DE OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PEZZOPANE, J. R. M.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, S. L. H.; MAIELLO, I. P.; BERNARDI, A. C. C.; SANTOS, S. A.; GARCIA, A. R. Modelo Agrometeorológico para Estimar a Temperatura de Superfície em Sistemas Silvipastoris. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE SISTEMAS SILVOPASTORILES, 12.; CONGRESO DE LA RED GLOBAL DE SISTEMAS SILVOPASTORILES, 2.; SEMINARIO NACIONAL DE SISTEMAS SILVOPASTORILES, 4., 2023, Montevideo. **Sistemas silvopastoriles**: hacia una diversificación sostenible. Cali: CIPAV, 2023. v. 1, p. 664-668.

PEZZOPANE, J. R. M.; MAIELLO, I. P.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; GARCIA, A. R.; BERNARD, A. C. C. Variabilidade espaçotemporal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa em sistema silvipastoril. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (org.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar na era digital. 1. ed. São Carlos: Cubo, 2024a. v. 1, p. 764-767. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000047.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; DE ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2013-2025, 2024b. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01038-y.

ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; SOUSA, M. A. P.; BALIEIRO, J. C. C.; BRANDÃO, F. Z.; TONATO, F.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORTUGAL, J. A. B.; GARCIA, A. R. Thermal comfort of Nelore (*Bos indicus*) and Canchim (*Bos taurus* x *Bos indicus*) bulls kept in an integrated crop-livestock-forestry system in a tropical climate. **Agricultural Systems**, v. 209, p. 103687, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103687.

SILVA, J. A. R.; ARAÚJO, A. A.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; SANTOS, N. F. A.; GARCIA, A. R.; NAHÚM, B. S. Conforto térmico de búfalas em sistema silvipastoril na Amazonia Oriental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1364-1371, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000033.

SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. The environment. In: SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. (ed.). **Principles of animal biometeorology**. London: Springer, 2013. pp. 1–38. DOI: http://doi.org/10.1007/978-94-007-5733-2_1

SILVA-PANDO, F. J.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, M. P.; ROZADOS-LORENZO, M. J. Pasture production in a silvopastoral system in relation with microclimate variables in the atlantic coast of Spain. **Agroforestry Systems**, v. 56, n. 3, p. 203-211, 2002. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1021359817311.

Capítulo 6

Solos

Alberto Carlos de Campos Bernardi, Amanda Maria Tadini, Wanderlei Bieluczyk, Gustavo Pereira Valani, Patrícia Perondi Anchão de Oliveira, Marina Justi, Lilianne dos Santos Maia Bruz, Marie Luise Carolina Bartz, George Gardner Brown, Ladislau Martin Neto



RESUMO: O solo é um sistema natural organizado em camadas, com uma ordenação física de minerais e matéria orgânica, que resultou de processos químicos, físicos e biológicos atuantes ao longo do tempo. É um componente fundamental dos ecossistemas terrestres, sua localização, composição e processos que acontecem ali exercem um papel crítico em seu funcionamento e na sustentabilidade da vida humana. Além de garantir a produção de alimentos, fibras e energia, também provém serviços ambientais como sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, infiltração e armazenamento de água, e abrigo da biodiversidade. O manejo sustentável dos solos é um meio importante para garantir a segurança alimentar e de preservar os serviços essenciais dos ecossistemas e a biodiversidade, constituindo-se também em uma ferramenta valiosa para a adaptação e combate às emergências climáticas , contribuindo para o processo de redução do carbono na atmosfera (descarbonização). Nesse sentido, os sistemas integrados de produção, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), apresentam-se como opção de manejo sustentável para melhoria da qualidade do solo, contribuindo para o equilíbrio dos agroecossistemas. Este capítulo apresenta os principais resultados científicos sobre os efeitos dos sistemas integrados sobre parâmetros químicos, físicos e biológicos de solo, indicando o potencial da integração e intensificação de pastagens para recuperação de funções importantes do solo.

Palavras-chave: Qualidade do Solo; Saúde do Solo; Fertilidade do Solo; Ciclagem de Nutrientes; Física do Solo; Matéria Orgânica; Minhocas.

ABSTRACT: Soil is a natural, organized body structured in distinct layers, characterized by a physical arrangement of mineral and organic components that results from long-term chemical, physical and biological processes. As

https://doi.org/10.4322/9786586819427-6

a fundamental component of terrestrial ecosystems, its location, composition, and processes play critical roles in ecosystem functioning and in the sustainability of human life. In addition to providing food, fiber, and energy, soil delivers essential environmental services, including carbon sequestration, nutrient cycling, water infiltration and storage, and habitat for biodiversity. Sustainable soil management is a vital strategy for ensuring global food security and preserving these essential ecosystem and biodiversity services. Furthermore, it constitutes a valuable tool for climate change adaptation and mitigation, contributing directly to the reduction of atmospheric carbon (decarbonization). In this context, integrated production systems, such as Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF), offer a sustainable management approach to enhance soil quality and stabilize agroecosystems. This chapter presents the principal scientific findings regarding the effects of ICLF systems on soil chemical, physical, and biological parameters, highlighting the potential of integrating and intensifying pastures to restore critical soil functions.
Keywords: Soil Quality; Soil Health; Soil Fertility; Nutrient Cycling; Soil Physics; Organic Matter; Earthworms.

6.1 INTRODUÇÃO

O solo constitui um importante elemento dos ecossistemas, reconhecido como um corpo natural cuja localização, composição e os processos exercem papel fundamental na dinâmica do planeta, no funcionamento dos ecossistemas e na sustentabilidade da vida humana. O trabalho de Mcbratney e Hartemink (2024) define o solo como uma mistura de fases sólida, líquida e gasosa horizontalizada na superfície da Terra, resultante de processos químicos e biológicos, e da organização física de minerais e matéria orgânica, que interage com a atmosfera, litosfera e hidrosfera, e que sustenta e opera dentro de ecossistemas terrestres, incluindo biodiversidade, plantas, animais e a humanidade.

As mudanças no uso da terra alteram os processos biogeoquímicos do solo, com reflexos nas funções, na qualidade e na saúde do solo. A conversão de florestas nativas para monoculturas anuais, ou pastagens mal manejadas, tem sido associada à redução da qualidade física, química e biológica do solo, perda do potencial produtivo e dos serviços ambientais associados (Qu et al., 2024). Já a adoção da agricultura conservacionista, principalmente dos sistemas integrados, recupera o potencial produtivo, o estoque de carbono (C), biodiversidade, ciclagem de nutrientes e os fluxos de gases entre o solo e a atmosfera (Marchão et al., 2024; Valani et al., 2023).

A intensificação e diversificação com os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPFs) são estratégias que, além de aumentar a sustentabilidade da agricultura, aumentam a diversidade e interações sinérgicas (com ganhos aditivos) no ambiente edáfico. Por isso, para o manejo sustentável do solo, é essencial uma abordagem multidisciplinar, com o conhecimento e a aplicação dos conceitos da ciência do solo (Hartemink; Mcbratney, 2025). Esses conceitos proporcionam a compreensão das propriedades físicas, químicas e biológicas, além de oferecerem instrumentos para diagnosticar problemas e implementar práticas de manejo adequadas.

A qualidade do solo refere-se à capacidade deste em desempenhar suas funções (físicas, químicas e biológicas), seja num ecossistema natural ou manejado (Larson; Pierce, 1994; Bünemann et al., 2018). Entre essas estão o funcionamento como meio para o crescimento das plantas, regulação e compartimentalização do fluxo de água no ambiente, estoque e promoção da ciclagem de elementos na biosfera, e tamponamento ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (Vezzani; Mielniczuk, 2009).

Embora a qualidade do solo seja, por vezes, considerada sinônimo da saúde do solo, esta última tem um sentido mais amplo, indicando a capacidade do solo de sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água, promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens, atuando na manutenção ou melhoria dos serviços ecossistêmicos (Doran; Zeiss, 2000; Lal, 2016; Karlen et al., 2019). A saúde do solo tem sido utilizada para ampliar a compreensão e a eficácia da gestão sustentável, pois indica a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo essencial e dinâmico, estendendo-se além de funções produtivas para objetivos de sustentabilidade mais amplos, que incluem a saúde humana e planetária (dentro dos limites do ecossistema) e dos usos da terra para sustentar a produção e biodiversidade vegetal e animal (Doran;

Zeiss, 2000; Karlen et al., 2019). Vale destacar que a Embrapa é a instituição que mais publica sobre qualidade e/ou saúde do solo em sistemas ILPF no mundo (Valani et al., 2020), o que evidencia o compromisso da instituição em investigar e promover estratégias agrícolas sustentáveis.

Os sistemas ILPF constituem uma alternativa relevante no contexto das estratégias para intensificação sustentável da agropecuária no Brasil, apresentando potencial para a recuperação de extensas áreas de pastagens degradadas, integração dos princípios da agricultura conservacionista e redução da emissão de gases de efeito estufa (Cortner et al., 2019; Sá et al., 2017). O uso mais eficiente do solo, aliado à implementação de práticas adequadas de manejo de pastagens e animais, pode elevar a produtividade dos produtos pecuários por unidade de área em até 2,5 vezes, quando comparada aos sistemas convencionais caracterizados por baixa capacidade de suporte e pastejo contínuo (Martha Júnior et al., 2012).

O manejo adequado do solo é fundamental para a manutenção e aprimoramento dos serviços ecossistêmicos (Bouma, 2014; Lal, 2016), que incluem a produção de alimentos, fibras e bioenergia; a regulação do clima por meio do sequestro de carbono; o controle hidrológico, que abrange a mitigação de inundações e a melhoria da qualidade da água; e a estabilização do solo, que previne a erosão. Adicionalmente, o solo funciona como um reservatório de biodiversidade e fortalece a resiliência dos ecossistemas frente às pressões impostas pelas mudanças climáticas e garantia da segurança alimentar.

A adoção dos sistemas integrados tem demonstrado que, além de aumentar a produtividade agrícola e pecuária, também aumenta a matéria orgânica do solo, mitiga as emissões líquidas de gases de efeito estufa e melhora a saúde do solo (Marchão et al., 2024; Oliveira et al., 2024a; Salton et al., 2014; Valani et al., 2023). Há um reconhecimento do papel vital do solo no enfrentamento dos desafios da segurança alimentar, mitigação das mudanças climáticas, prestação de serviços ecossistêmicos, proteção das paisagens e promoção do desenvolvimento humano, porém, a complexidade e a importância dos solos são frequentemente ofuscadas por preocupações ambientais mais visíveis (Gama, 2023).

Apesar do alto grau de intemperismo e da baixa fertilidade natural dos solos brasileiros, práticas de agricultura conservacionista, como a integração lavoura-pecuária-floresta e o plantio direto, aliadas ao manejo adequado da fertilidade, possibilitam que esses solos sejam altamente produtivos, e ainda atuem como importantes sumidouros de carbono, aumentando os estoques de carbono orgânico do solo (SOC) (Sá et al., 2017; Madari et al., 2024; Benites et al., 2023).

6.2 ATRIBUTOS, QUALIDADE E SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS

Os sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF) têm apresentado resultados positivos em diversos indicadores de qualidade e saúde do solo, abrangendo propriedades químicas, físicas e biológicas (Valani et al., 2022; Oliveira et al., 2024a; Bruz et al., 2023; Bosi et al., 2020b). Estes sistemas promovem sinergias entre os componentes arbóreos, agrícolas e pecuários, resultando em melhorias nos atributos biológicos (por exemplo, aumento da diversidade de microrganismos), químicos (por exemplo, maior presença de matéria orgânica e nutrientes) e físicos (por exemplo, maior estabilidade de agregados e melhoria da retenção e da capacidade de infiltração de água), mantendo o solo mais fértil, saudável e produtivo. O monitoramento da qualidade do solo por meio de atributos químicos, físicos e biológicos é uma ferramenta essencial para avaliar a qualidade dos sistemas agrícolas, bem como para mensurar sua capacidade de fornecer serviços ambientais (Adhikari; Hartemink, 2016). O Capítulo 14 detalha os serviços ecossistêmicos e ambientais em sistemas ILPF.

6.2.1 Atributos químicos

Os atributos químicos referem-se ao conjunto de parâmetros que expressam a disponibilidade, capacidade de retenção e dinâmica de nutrientes, além da acidez dos solos e presença de potenciais elementos tóxicos como o alumínio. Estão intimamente relacionados ao desenvolvimento de plantas e rendimento da produção agropecuária, e também influenciam no desenvolvimento e atividade microbiana, conforme veremos no próximo tópico.

A análise química do solo emprega métodos laboratoriais específicos para estimar a disponibilidade de nutrientes, simulando o potencial de extração pelas plantas. Trata-se de uma ferramenta fundamental para embasar decisões sobre o manejo da fertilidade, pois a

correta interpretação dos resultados permite planejar intervenções químicas de modo eficiente e racional (Van Raij, 1991). Os dados obtidos por meio da análise possibilitam determinar o estoque de nutrientes no solo, identificar eventuais limitações químicas antes do plantio e definir recomendações adequadas de correção e adubação. Ademais, o monitoramento do balanço de nutrientes no sistema solo-planta configura-se como um indicador relevante da sustentabilidade do uso agrícola do solo (Hayati et al., 2010). O estabelecimento da análise de solo em determinada região ou estado é precedido por rigorosos estudos de pesquisa voltados à seleção dos métodos analíticos, os quais são fundamentados por avaliações de correlação e calibração (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015).

A interpretação dos indicadores químicos revela-se fundamental para determinar a necessidade de correção da fertilidade do solo, bem como para orientar a escolha das práticas de manejo agrícola mais adequadas. A análise do solo provê dados que subsidiam decisões técnicas relativas à adubação, à calagem (correção da acidez) e a outras intervenções no manejo, com o objetivo de otimizar a ciclagem de nutrientes e promover a sustentabilidade do sistema produtivo. A intensificação sustentável com a adoção de sistemas integrados aumenta a fertilidade do solo e a ciclagem de nutrientes (Bernardi et al., 2019; Valani et al., 2020; Babos et al., 2024; Oliveira et al., 2024b).

O conhecimento da dinâmica dos nutrientes no solo em sistemas integrados é fundamental para estabelecer ajustes na recomendação de adubos e corretivos. O balanço de nutrientes no sistema solo-planta pode ser considerado um indicador da sustentabilidade do uso agrícola do solo (Hayati et al., 2010). A diferença entre a quantidade do nutriente exportada com a colheita e aplicada com o fertilizante indica o grau de aumento ou de redução do conteúdo dos nutrientes no solo e, quando a saída de um nutriente é maior que a entrada na lavoura, a condição é de insustentabilidade (Oenema et al., 2003). A aplicação inadequada de nutrientes pode ocasionar balanços negativos, diminuindo a fertilidade do solo, reduzindo tanto a produtividade quanto a rentabilidade do sistema agrícola e promovendo o esgotamento das reservas naturais do solo. Por outro lado, a aplicação excessiva de insumos leva a balanços excessivamente positivos, e resulta em baixa eficiência de uso de nutrientes e baixo desempenho econômico (Baligar et al., 2001).

Indicadores químicos

pH: indicativo da acidez ou alcalinidade do solo, influenciando a disponibilidade de nutrientes, atividade microbiana e vegetal.

Matéria orgânica: indica a quantidade de matéria orgânica presente, que interfere na fertilidade, estrutura e capacidade de retenção de água do solo. Por ser fonte de energia para a atividade biológica, também tem sido considerada um indicador biológico em muitas avaliações de qualidade e saúde do solo.

Disponibilidade ou teores de nutrientes: medição de macro e micronutrientes essenciais para as plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), boro (B), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e níquel (Ni).

Capacidade de Troca Catiônica (CTC): quantidade total de cátions (íons com carga positiva) que o solo pode reter e trocar, indicando sua capacidade de armazenar nutrientes essenciais.

Saturação por alumínio: quantidade de alumínio presente no solo, que pode ser tóxico para as plantas em altas concentrações, especialmente em solos ácidos.

Soma de bases: refere-se à quantidade total de cátions básicos (cálcio, magnésio, potássio e sódio) no solo, que são importantes para o desenvolvimento das plantas.

Saturação por bases (V%): indica a porcentagem da capacidade de retenção de nutrientes do solo (CTC) que está ocupada por cátions básicos.

O ILPF permite uma estratégia de fertilização do sistema, que maximiza os benefícios dos sistemas integrados e a produtividade. Esta estratégia tem como base o fornecimento de nutrientes durante a fase de menor exportação e, consequentemente, maior ciclagem, buscando aumentar a eficiência da utilização de nutrientes, aumentando a produção animal sem comprometer a produtividade das culturas de

grãos em solos com fertilidade acumulada (Anghinoni; Vezzani, 2021). Em sistemas integrados, sobretudo pela ação da dinâmica de crescimento e renovação de raízes e parte aérea de diferentes espécies, observa-se maior ciclagem de nutrientes como o fósforo, e sobretudo o potássio, em relação a sistemas exclusivos de pastagem ou monocultura de grãos (Assmann et al., 2017; Almeida et al., 2021; Farias et al., 2025).

Os resultados apresentados na Tabela 6.1 ilustram os efeitos da calagem e adubação dos sistemas integrados e de pastagens em dois períodos de avaliação em comparação com o solo de referência sob Mata Atlântica. Há uma tendência clara de acidificação do solo nos diferentes usos, em comparação ao padrão sob vegetação natural. Os resultados da análise química do perfil de solo do sistema ILP-Corte (detalhado no Capítulo 3) indicam que as calagens realizadas foram eficientes para aumento da CTC e da V%, mas em valores inferiores aos observados no solo sob mata nativa, porém mais elevados que na pastagem extensiva. No entanto, as adubações com P e K provavelmente foram suficientes para atender às exportações na produção de silagem de milho e sorgo que ocorreram na área, porém não foram suficientes para corrigir o solo e elevar sua fertilidade. Com o estabelecimento do sistema ILPF-Corte (Capítulo 3), o manejo da calagem foi alterado, sendo realizado a lanço em superfície e sem incorporação. Mesmo assim, há uma tendência ao aumento nos valores de pH e saturação por bases nas camadas mais profundas do solo, especialmente nos sistemas ILP e ILPF, indicando que a calagem aplicada superficialmente é eficaz na redução da acidez do solo e no aumento das bases trocáveis do solo. O impacto da fertilização das culturas forrageiras, como milho e pastagens, refletiu-se no aumento dos teores de fósforo e potássio, especialmente nas camadas superficiais do solo (até 20 cm de profundidade), nos sistemas ILPF e ILP (Tabela 6.1). O maior acúmulo desses macronutrientes no sistema ILPF é explicado pela menor produção de milho e pasto nos sistemas arborizados, como descrito no Capítulo 7 (Produção vegetal).

Da mesma forma com que houve uma redução na produção total da biomassa de forrageiras, também houve uma variação da produtividade, considerando a posição em relação ao renque de árvores. Como já descrito por Pezzopane et al. (2019a) e no Capítulo 7, há uma tendência do "efeito parabólico", em que

Tabela 6.1. Características químicas do solo sob influência de diferentes sistemas de pastejo em comparação com a Mata Atlântica.

Parâmetro	Camada (cm)	2010			2016				
		Veg. Nat.	EXT	ILP-Corte	INT	IPF	ILPF	ILP	EXT
pH-$CaCl_2$	0–5	6,2	5,0	5,0	5,3	5,4	5,5	5.5	5,2
	5–10	6,0	5,0	4,9	5,1	4,8	5,1	5.1	4,9
	10–20	5,8	4,9	4,6	4,8	4,6	5,0	4.9	4,8
	20–30	5,4	4,5	4,3	4,7	4,4	4,9	4.8	4,7
	30–40	5,2	4,6	4,4	4,7	4,4	4,9	4.7	4,6
	40–60	5	4,6	4,3	4,7	4,4	4,9	4.8	4,6
	60–80	4,9	4,7	4,4	4,9	4,5	5,0	5.0	4,8
	80–100	4,9	4,9	4,5	5,0	4,6	5,1	5.0	4,9
SEM	–	0,116	0,044		0,031				
P (mg dm^{-3})	0–5	12,7	5,0	5,7	18,7	10,6	37,3	15.7	8,7
	5–10	9,3	5,0	5,3	13,6	7,0	21,2	11.1	5,4
	10–20	7,2	3,7	4,7	7,2	4,1	7,0	12.5	4,5
	20–30	4	3,3	1,3	3,8	3,6	4,7	4.6	3,1
	30–40	3,8	2,7	1,0	3,3	3,1	3,0	3.1	2,7
	40–60	3,5	2,0	1,0	2,9	3,2	3,0	2.6	2,3
	60–80	3	1,7	1,0	2,6	3,3	3,2	3.3	2,2
	80–100	4,7	1,7	2,0	3,2	3,3	3,2	3.0	2,3
SEM	–	0,549	0,314		0,841				
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0–5	2,5	1,5	1,9	4,0	2,7	3,2	3,3	2,2
	5–10	1,9	1,1	1,6	2,7	1,9	1,9	1,9	1,6
	10–20	1,7	0,8	1,1	1,9	1,5	1,6	1,4	1,4
	20–30	1,4	0,7	0,6	1,4	1,2	1,2	1,1	1,2
	30–40	1	0,6	0,5	1,1	0,9	1,1	0,8	1
	40–60	0,9	0,7	0,4	1,0	0,8	1,0	0,8	0,9
	60–80	1,5	0,5	0,2	1,0	0,8	1,0	0,9	0,8
	80–100	1,7	0,5	0,2	0,9	0,7	0,9	0,8	0,7
SEM	–	0,153	0,083		0,064				
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	0–5	153,7	60,7	81,3	84,2	82,7	89,5	90,4	77,6
	5–10	114,3	57,3	70,3	75,8	71,8	72,1	75,9	67,3
	10–20	93,8	52,7	59,7	70,3	68,0	63,8	66,6	63,8
	20–30	78	49,7	45,7	64,1	64,8	59,7	60,3	60,1
	30–40	73,8	44,3	45	57,9	61,4	55,3	54,4	55,1
	40–60	65,5	42	38	52,9	55,0	50,8	46,5	49,2
	60–80	84,7	36,3	32,7	44,9	49,2	46,1	39,5	43,0
	80–100	49,7	28	28,7	40,6	44,7	42,4	37,8	39,2
SEM	–	3,392	1,541		1,186				
V (%)	0–5	81,8	53,3	61,3	66,4	62,4	66,4	72,4	58,9
	5–10	76,0	51,3	59,0	50,3	41,6	50,5	55,9	47,3
	10–20	70,8	42,0	42,0	41,3	35,2	46,1	49,2	41,4
	20–30	58,8	32,7	26,7	38,9	30,5	43,2	44,6	37,8
	30–40	50,7	33,3	23,7	37,6	29,1	41,4	41,8	35,8
	40–60	45,5	31,3	23,3	38,4	29,4	41,2	42,8	36,4
	60–80	39,5	27,0	23,7	40,6	31,5	43,3	44,1	36,8
	80–100	36,5	23,0	21,3	40,8	31,9	42,6	42,5	40,2
SEM	–	3,236	1,941		0,979				

SEM (*Standard error of the means*): erro-padrão das médias. Traço (–): informação não aplicável.
Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2024b).

há maior produtividade na região central entre as fileiras de árvores, em comparação às bordas, devido a diferenças em transmissão de luz. Essas diferenças também se refletem no solo, considerando as distâncias de amostragem das árvores (Figura 6.2).

As análises de solos devem utilizar métodos com menor tempo analítico, de menor custo e com baixo impacto ambiental. As técnicas fotônicas, como a Emissão Óptica com Plasma Induzido por Laser (LIBS), têm-se tornado metodologias promissoras na avaliação dos teores de carbono e de nutrientes nos solos agrícolas (Tadini et al., 2021; Babos et al., 2024). O mapa de variabilidade espacial da CTC indica um aumento na camada superficial (10 cm de profundidade) com valores elevados (CTC ≥ 75 $mmol_c\ dm^{-3}$) para todos os pontos amostrais, provavelmente devido ao efeito da calagem superficial e da MOS (Figura 6.1c). O atributo pH ($CaCl_2$) segue a tendência de maiores valores nas camadas superficiais e são menores especialmente próximo das árvores, provavelmente pela absorção dos cátions (Ca, Mg e K) pelas árvores de eucalipto (Figura 6.1b).

A partir da análise das amostras de solo georreferenciadas e da aplicação de técnicas de geoprocessamento (Capítulo 15), foram elaborados os mapas da necessidade de calagem e adubação fosfatada do sistema ILPF-Corte. Além da variabilidade espacial, indicando as necessidades específicas de cada região amostrada, a Figura 6.2 também mostra a evolução na fertilidade do solo, representada pela redução da necessidade de corretivos e fertilizantes, assim como também a homogeneização da área.

6.2.1.1 Matéria orgânica do solo (MOS)

O solo atua como um importante reservatório de carbono na forma de matéria orgânica. A quantidade de carbono orgânico (COS) armazenada no solo é aproximadamente o dobro do carbono presente na atmosfera, e entre duas e três vezes superior ao volume de carbono encontrado nos organismos vivos de todos os ecossistemas terrestres do planeta (Lal, 2004). Globalmente, estima-se que os solos armazenam aproximadamente 2.500 Pg de carbono na camada até 1 m de profundidade.

A matéria orgânica do solo (MOS) é um indicador relevante da qualidade e saúde do solo, que tem relação direta com as propriedades químicas, físicas e biológicas. As variações nos teores e na sua qualidade permitem avaliar os impactos das práticas de manejo. Diversas funções e processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo estão relacionados diretamente com a presença da MOS, por isso muitos pesquisadores a consideram como o indicador ideal para avaliar a qualidade do solo (Karlen et al., 2019; Franzluebbers, 2002; Lal, 2016; Sá et al., 2017; Bernardi et al., 2023). O Capítulo 10 explora os mecanismos de acúmulo e estabilização do carbono no solo, destaca a relevância da matéria orgânica, além de enfatizar a contribuição das árvores para o aumento da biomassa aérea e a formação de estoques de carbono mais duradouros.

Solos sob sistemas ILPF têm o potencial de capturar e sequestrar carbono, e de aumentar a quantidade de MOS, contribuindo na mitigação das emissões de gases causadores do efeito estufa na agricultura. Dessa forma, solos sob ILPF proporcionam serviços ambientais como sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, regulação do fornecimento de água, controle das emissões de gases de efeito estufa, manutenção da biodiversidade e controle biológico (Bernardi et al., 2023; Valani et al., 2020, 2023), reforçando sua importância na regulação das funções dos ecossistemas (Rocha Junior et al., 2020).

Os resultados indicaram que, em comparação ao monocultivo de pastagem sob manejo extensivo, os solos sob sistema ILPF apresentam maior acúmulo de carbono, com incrementos na quantidade e estabilidade da matéria orgânica (Bieluczyk et al., 2020; Bernardi et al., 2023; Tadini et al., 2021, 2022a, 2022b; Oliveira et al., 2024b). O efeito combinado da calagem e adubação das culturas anuais, pastagem e árvores aumenta a produtividade, a adição de biomassa aérea e radicular e, consequentemente, os teores de carbono do solo até 30 cm de profundidade, como apresentado na Figura 6.3. Em alguns casos, os níveis de carbono se igualam aos encontrados em áreas de vegetação nativa de referência, comprovando o impacto positivo dessas estratégias sobre a dinâmica do carbono em sistemas pecuários integrados (Tadini et al., 2022; Oliveira et al., 2024). Nas camadas mais profundas, entre 60 cm e 100 cm do solo, os sistemas ILPF e IPF apresentaram maiores concentrações de carbono em comparação aos sistemas sem componente arbóreo (ILP e EXT), evidenciando que a presença de árvores favorece a incorporação de carbono em profundidade, ainda que em níveis inferiores aos observados na floresta de referência. Esses resultados corroboram

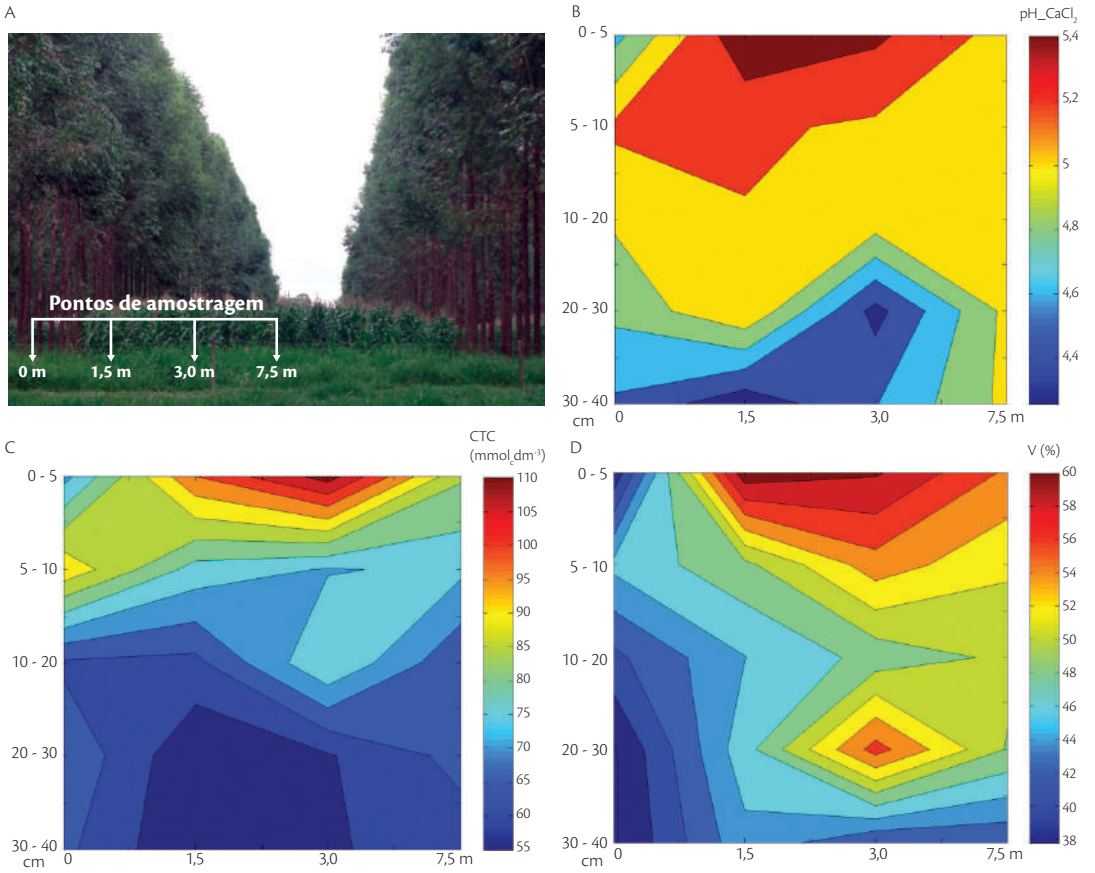


Figura 6.1. Pontos de amostragem em relação ao renque de árvores, e variabilidade espacial e em profundidade dos parâmetros de fertilidade (A); pH ($CaCl_2$) (B); capacidade de troca catiônica (CTC) (C); e saturação por bases (V%) do sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) (D).
Fonte: Adaptado de Babos et al. (2024).

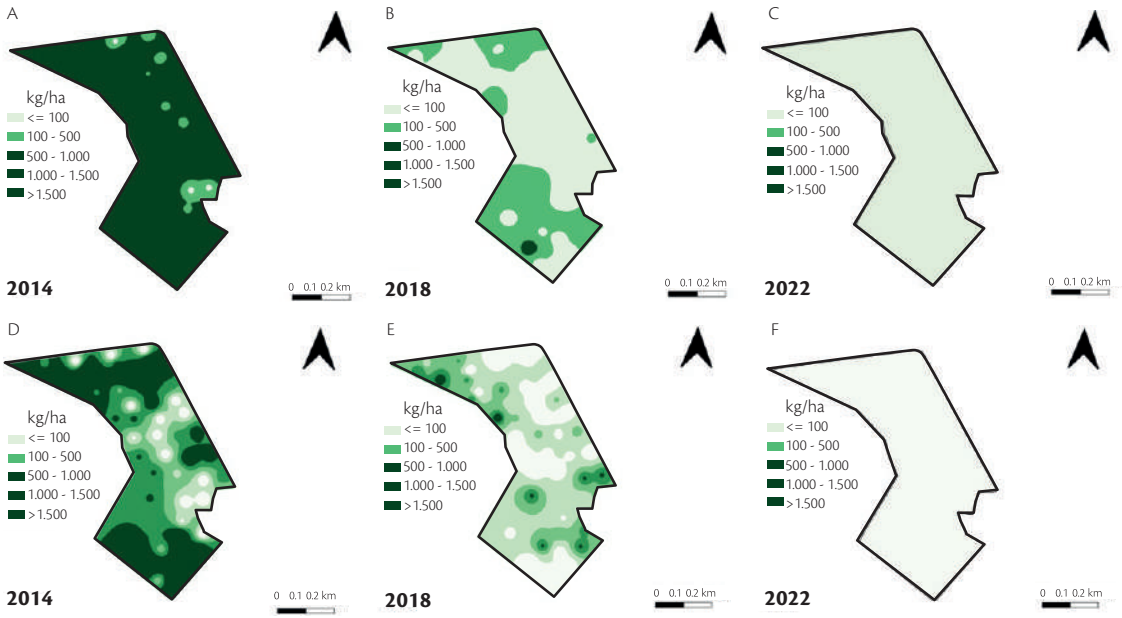


Figura 6.2. Mapas da necessidade de aplicação de calcário e fósforo no sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) nos anos de 2014 (A, D), 2018 (B, E) e 2022 (C, F).

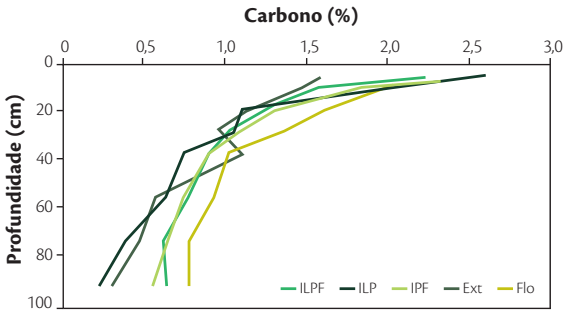


Figura 6.3. Teor de C em função da profundidade de amostragem e dos sistemas integrados no integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte).
Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2024b).

os achados de Oliveira et al. (2018), que avaliaram os estoques de carbono até um metro de profundidade e identificaram aumentos significativos entre 30 cm e 100 cm em sistemas ILPF, em relação a pastagens manejadas extensivamente no sul da Amazônia. Com o uso do isótopo estável ^{13}C, os autores evidenciaram que esse acúmulo foi devido à adição de material orgânico proveniente de plantas C_3 (arbóreas), evidenciada pela depleção nos valores de $\delta^{13}C$.

Amostras de solos do sistema ILPF-Corte também foram analisadas quanto ao teor de carbono (C) por espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), apresentando forte correlação (R = 0,86) com a técnica de referência CHN (Carvalho et al., 2019). De forma complementar, Tadini et al. (2021) avaliaram o índice de humificação (HLIFS) da matéria orgânica do solo (MOS) por espectroscopia de fluorescência induzida por laser (LIFS) em sistemas integrados (ILPF e ILP), identificando correlação positiva (R = 0,79) entre o HLIFS e a razão CTC/teor de C. Essa relação foi observada em todas as amostras, demonstrando o potencial das análises fotônicas para estimar indiretamente a CTC a partir do teor de C e dos dados de LIFS.

Esses resultados demonstram que LIBS e LIFS constituem metodologias viáveis para a determinação rápida de C e de parâmetros químicos do solo, oferecendo medições acessíveis e sem geração de resíduos (Carvalho et al., 2019; Tadini et al., 2021). Além disso, estudos recentes apontam que solos sob ILPF apresentam maior biorreatividade devido à diversidade de resíduos orgânicos, como restos de capim-piatã, milho, folhas, exsudatos de eucalipto e dejetos bovinos, os quais favorecem o acúmulo de MOS, aumentam o estoque de C e elevam sua biorreatividade (Tadini et al., 2022a, 2022b, 2022c).

As análises espectroscópicas nesses solos também confirmaram maior acúmulo de MO e presença de estruturas aromáticas em profundidade, associadas à estabilidade química (Tadini et al., 2021; Babos et al., 2024). Dessa forma, mesmo com maior grau de humificação, ou seja, de transformação desse material orgânico, os solos ILPF mantêm-se dinâmicos, permitindo transformações mais eficientes e diversificação da MOS em comparação a outros manejos agrícolas.

A maior estabilidade da MOS nos sistemas integrados também foi verificada pelo método do *Tea Bag Index* – TBI. Os resultados obtidos no sistema ILPF-Corte indicaram que a presença das árvores influenciou os parâmetros de decomposição da matéria orgânica (Bessi et al., 2024). O fator de estabilização (S) apresentou menor valor no tratamento de pastejo contínuo extensivo, mas aumentou significativamente, tanto com a intensificação (INT) quanto com a presença de árvores (Figura 6.4). Por outro lado, as menores taxas de decomposição (k) foram observadas nos tratamentos com árvores, sendo as menores taxas nos sistemas integrados de pecuária com árvores (IPF, ILPF) do que no tratamento ILP, enquanto o sistema intensivo apresentou valores intermediários. No solo sob floresta, os valores registrados de S e k foram semelhantes aos de sistemas integrados com árvores.

6.2.1.2 Influência dos bovinos em pastejo nos atributos químicos

Os ruminantes influenciam a ciclagem e a distribuição dos nutrientes no solo, via desfolha das plantas forrageiras, e o seu retorno para o solo, pela excreção na forma de esterco e urina. O retorno de nutrientes à pastagem na forma de fezes e urina em pastagens segue um padrão de distribuição variável (Haynes; Williams,1993). O retorno dos nutrientes é influenciado pelo comportamento animal e pelo manejo empregado, e depende da quantidade (número) de excretos depositados, da proporção da área da pastagem ocupada, do grau de uniformidade de sua distribuição, da taxa de nutrientes retornados e do aproveitamento desses nutrientes pelas plantas (Ferreira et al., 2011). Os animais modificam as taxas e os fluxos dos processos sistêmicos, reciclando o material orgânico e determinando a dinâmica dos nutrientes (Anghinoni et al., 2013).

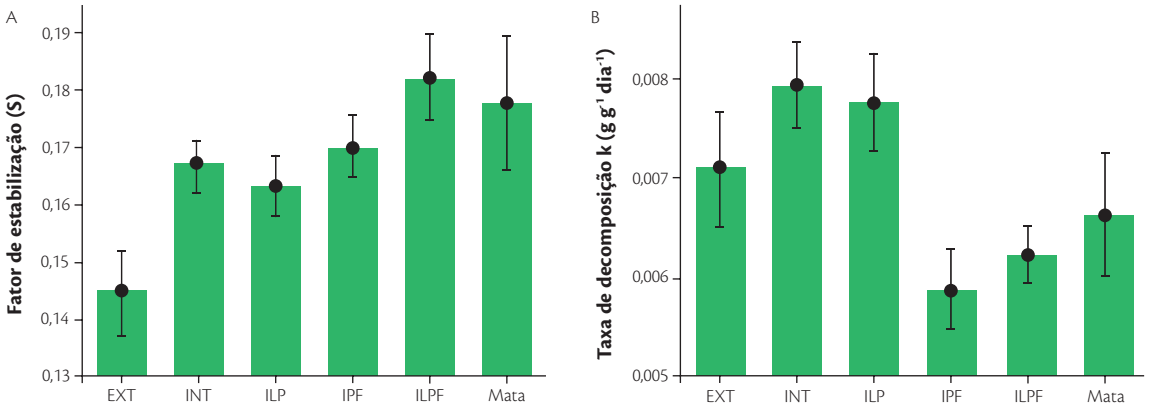


Figura 6.4. Fator de estabilização - S (A) e taxa de decomposição - k (B).
Fonte: Adaptado de Bessi et al. (2024).

Existe uma grande variação da razão carbono: nitrogênio (C:N) nos componentes solo, plantas e animais (Soussana; Lemaire, 2014). No geral, a razão C:N tende a ser menor em materiais ricos em nitrogênio (como proteínas e urina) e maior em materiais mais lignificados ou com menor teor de nitrogênio (como serapilheira). No componente vegetal, a razão C:N geralmente é mais baixa nas proteínas fotossintéticas e folhas jovens, aumentando em exsudatos radiculares, rizomas, caules e, especialmente, na serapilheira. Já a matéria orgânica do solo (MOS) tem uma razão C:N relativamente baixa, enquanto a matéria orgânica particulada (MOP) grossa e fina apresenta valores mais elevados. E as excretas dos animais como urina têm as menores razões C:N, seguidos pelo esterco com uma razão C:N um pouco mais alta, mas com valores próximos à MOS. Por isso, os animais em pastejo têm papel fundamental na ciclagem de nutrientes, atuando como agentes catalisadores, pois modificam as taxas e os fluxos dos nutrientes, reciclando o material orgânico. As excretas podem retornar cerca de 90% do K, 30-60% do P e 10-55% do N. Em sistemas com pastagens bem manejadas, as produções agrícolas podem ser aumentadas com a presença do animal e a variabilidade de produção diminuída (Anghinoni et al., 2013).

Existe uma relação direta e positiva entre o número de fezes depositados e o tempo total de permanência dos animais (Haynes; Williams, 1993; Bráz et al., 2003). Essas áreas, onde os animais permaneceram a maior parte do tempo, são as áreas de descanso e ruminação, e concentram-se em locais próximos aos bebedouros, cercas e porteiras, bem como nas áreas sombreadas.

Assim, a presença de árvores nos sistemas integrados, como o ILPF, pode modificar a dinâmica de deposição das excretas, e consequentemente suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Carnevalli et al. (2019) verificaram que em um sistema ILP havia maior concentração de placas de fezes próximas às porteiras e bebedouros, já no IPF a maior concentração estava na área central e sob a sombra das árvores, e no entorno sob sua influência. Os autores constataram que a distribuição foi mais homogênea quando havia maior número de árvores, e quanto maior era a área sombreada no pasto, maior era a uniformidade da distribuição. Carpinelli et al. (2020) avaliaram a deposição de esterco pelos bovinos em sistemas integrados, e verificaram que no ILP não houve um padrão uniforme de deposição, enquanto no IPF a distribuição espacial era mais homogênea, apesar de alguns pequenos pontos de concentração próximo aos bebedouros e das porteiras. No entanto, os autores não verificaram efeito na dinâmica de decomposição e liberação N, P, K e S, e níveis desses nutrientes têm relação direta com número de animais, período de pastejo e quantidade de esterco.

6.2.2 Atributos físicos

As propriedades físicas do solo são características mensuráveis que descrevem a organização e o arranjo das partículas sólidas, água e ar no solo. Essas propriedades determinam a resposta do solo aos fatores externos como água, ar, calor e forças mecânicas, e ao manejo.

A compreensão das propriedades físicas do solo revela-se fundamental para a preservação da sua

Indicadores físicos

Densidade do solo: relação entre a massa do solo e seu volume, podendo ser aparente (incluindo poros) ou real (apenas partículas sólidas). Há uma correlação inversa com o teor de argila, e é também influenciada pela estrutura ou o grau de compactação do solo.

Porosidade: é o volume de espaços vazios (poros) no solo, que pode ser preenchido por água e/ou ar. Influenciam a retenção de água, a aeração e a movimentação de fluidos no solo.

Resistência à penetração: mede a força necessária para inserir um objeto (como uma sonda ou raiz) no solo. É um indicador da compactação do solo e da dificuldade de desenvolvimento das raízes.

Regime hídrico: refere-se ao conjunto de processos, incluindo a infiltração, escoamento superficial, drenagem e capacidade de retenção de água do solo, que determinam a dinâmica da água no perfil. É crucial para o desenvolvimento das plantas e para a prevenção de problemas como erosão.

Condutividade hidráulica: mede a capacidade do solo de conduzir água. É afetada pela textura e estrutura do solo.

Estabilidade de agregados: refere-se à resistência dos agregados do solo à desagregação, influenciando a resistência ou susceptibilidade à erosão e a aeração.

Umidade do solo: a quantidade de água presente no solo, afetando a disponibilidade de nutrientes e a atividade biológica.

Temperatura do solo: influencia o crescimento das plantas e a atividade microbiana.

Cor do solo: pode indicar a composição e as condições de umidade do solo.

Fonte: Adaptado de Hillel (2013); Valani et al. (2020) e Van Lier et al. (2021).

qualidade e para o êxito das atividades agrícolas. Essas características influenciam de forma direta a disponibilidade de água e nutrientes às plantas, o crescimento e aprofundamento das raízes, a aeração adequada e a resistência à erosão. A análise criteriosa desses atributos permite desvendar o comportamento do solo diante das diferentes práticas de manejo, favorecendo a adoção de estratégias que promovam sua melhoria contínua e o aumento da produtividade.

Ainda há poucos resultados sobre as propriedades físicas de solos em sistemas ILPF e são pouco conclusivos (Valani et al., 2020; Oliveira et al., 2024a). Sistemas de ILPF podem, por exemplo, aumentar (Fernandes et al., 2016) ou diminuir (Assis et al., 2015) a densidade do solo. Anghinoni et al. (2013) comparam diversos trabalhos que estudaram as mudanças nas propriedades físicas do solo em sistemas ILP, e apesar da ocorrência de leve compactação superficial do solo, as demais características não são afetadas negativamente. Isso sugere que o impacto dos sistemas ILPF nas propriedades físicas do solo depende do arranjo de cada sistema, incluindo as espécies cultivadas, taxas de lotação animal e tempo de estabelecimento do sistema.

Os sistemas silvipastoris promovem a redução do escoamento superficial pela interceptação da água da chuva pelo dossel arbóreo, o aumento da permeabilidade do solo e o aumento da rugosidade superficial, fatores que contribuem para retardar o movimento horizontal da água (Nicodemo; Primavesi, 2019). Além disso, resultados do experimento ILPF-Corte mostram os sistemas integrados com árvores (ex. IPF e ILPF), promovem aumento na condutividade hidráulica do solo saturado em relação a sistemas integrados sem árvores (ex. ILP) ou a pastagens em monocultivo (Valani et al., 2022). Esse aumento pode ser resultado de fluxos preferenciais formados por canais radiculares em decomposição (Noguchi et al., 1999; Valani et al., 2025), bem como por raízes vivas, que modificam o padrão de escoamento da água ao desviar o fluxo para a região ao redor das raízes, onde o solo tende a ser menos compactado e mais condutivo (Noguchi et al., 1997). Esses caminhos preferenciais de fluxo estão associados principalmente à presença de macroporos formados pela atividade biológica (Gerke, 2006; Luo et al., 2010; Sidle et al., 2001; Valani et al., 2025), o que foi comumente observado nos sistemas ILPF-Corte da Embrapa Pecuária Sudeste, conforme ilustrado na Figura 6.5.

O componente arbóreo nos sistemas ILPF também altera o comportamento de curvas de retenção da água no solo (Figura 6.6). Em superfície, as curvas de retenção de sistemas integrados com árvores (ILF e ILPF) são semelhantes à vegetação natural (NV) e

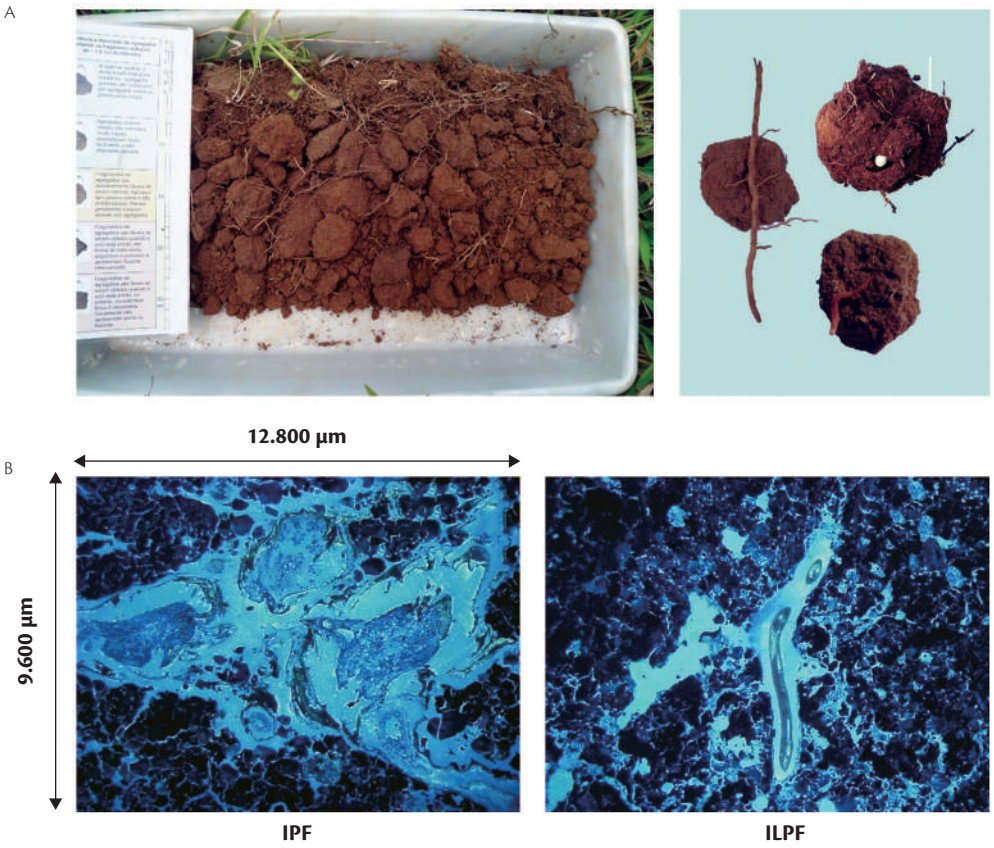


Figura 6.5. Contribuição da atividade biológica nas propriedades físicas do solo em sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), incluindo em escala macroscópia (agregados com raízes, minhocas e macrofauna edáfica) (A) e microscópia (fluxos preferenciais em sistemas integrados com árvores formados por atividade biológica, facilitando a condução de água no solo) (B).
Fonte: Adaptado de Valani (2024) e Valani et al. (2025).

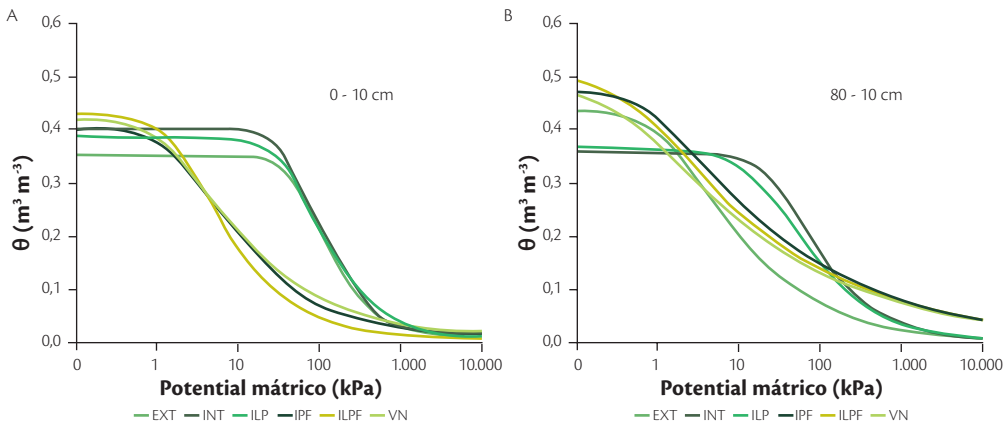


Figura 6.6. Curva de retenção de água do solo para a camada de 0–10 cm (A) e 80–100 cm (B) em sistemas integrados e não integrados no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-Corte (ILPF-Corte) na Embrapa Pecuária Sudeste.
Fonte: Adaptado de Valani (2024).

contrastam com sistemas sem árvores (EXT, INT e ILP). Essas diferenças são menos notáveis a 100 cm de profundidade. O eucalipto nos sistema ILPF-Corte forma associações ectomicorrízicas e apresenta maior incorporação de necromassa de raízes finas na camada de 0-70 cm, em comparação à pastagem extensiva

(Bieluczyk et al., 2021; 2024), o que pode favorecer a retenção de água. Além disso, árvores em sistemas integrados exploram camadas mais profundas do solo em relação às árvores em sistemas não integrados (Zhao et al., 2023), o que potencializa a eficiência no uso da água e confere maior resiliência aos sistemas, sobretudo diante das mudanças climáticas e de períodos prolongados de seca.

Diversos indicadores físicos de qualidade do solo foram avaliados no sistema ILPF-Corte da Embrapa Pecuária Sudeste. Os resultados (Tabela 6.2) mostraram que todos os sistemas de pastejo apresentam maior densidade do solo e resistência do solo à penetração que o solo sob vegetação nativa, sugerindo uma compactação causada pelo pisoteio do gado (Valani et al., 2022). Apesar da semelhança entre sistemas integrados e não integrados, que pode estar relacionada ao tempo de estabelecimento do experimento (Valani et al., 2022), o sistema ILPF apresentou maior condutividade hidráulica do solo saturado e maior carbono orgânico total que o sistema EXT. Além disso, os sistemas integrados possuíam maior taxa de lotação animal e maior carga de tráfego de máquinas, o que não resultou em degradação da qualidade física em relação aos sistemas não integrados. Práticas que mantenham ou melhorem a qualidade física do solo podem ser utilizadas, como o uso de pneus de baixa pressão, tráfego controlado, rotações de culturas mais diversificadas e a manutenção de resíduos vegetais cobrindo o solo, todas elas contribuindo para a melhor conservação do solo como recurso natural.

Tabela 6.2. Médias ± EP (n = 4) de indicadores de qualidade do solo na camada superficial (0-10 cm) de sistemas integrados e não integrados no experimento ILPF-Corte.

	Ksat ($mm\ h^{-1}$)	DS ($g\ cm^{-3}$)	RP (MPa)	COT ($dag\ kg^{-1}$)
EXT	17,54 ± 1,77 c	1,49 ± 0,01 b	2,87 ± 0,34 a	1,95 ± 0,04 b
INT	18,79 ± 2,93 c	1,44 ± 0,06 b	3,16 ± 0,67 a	2,13 ± 0,09 ab
ILP	23,02 ± 1,34 c	1,48 ± 0,02 b	3,10 ± 0,29 a	2,10 ± 0,13 ab
IPF	44,63 ± 6,48 b	1,47 ± 0,02 b	3,52 ± 0,45 a	2,07 ± 0,04 ab
ILPF	69,25 ± 10,58 b	1,56 ± 0,02 b	3,47 ± 0,49 a	2,38 ± 0,06 a
VN	313,97 ± 55,48 a	1,17 ± 0,06 a	0,94 ± 0,22 b	2,15 ± 0,10 ab

EP: erro-padrão; EXT: sistema de pastagem extensivo; INT: pastagem intensiva; IPF: sistema de integração pecuária-floresta; ILP: sistema de integração lavoura-pecuária; ILPF: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; Ksat: condutividade hidráulica saturada do solo; DS: densidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; COT: carbono orgânico total. Médias seguidas pelas mesmas letras em cada coluna não diferem significativamente (teste de Kruskal-Wallis, p > 0,05).
Fonte: Adaptado de Valani et al. (2022).

6.2.2.1 Pisoteio animal

Um diferencial dos sistemas integrados na área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste é a presença constante do componente animal (Capítulos 3, 8 e 9), influenciando o sistema solo-planta-animal. Diferentemente de outros trabalhos que tratam apenas dos benefícios da inclusão de gramíneas, como plantas de cobertura na rotação, sem considerar os efeitos dos animais, os sistemas ILP-Corte, ILPF-Corte, ILPF-Leite e SSP-Nativas, representam as condições reais e as interações que ocorrem nos sistemas integrados. O pisoteio animal é uma das principais causas de compactação do solo (Batey, 2009) e está limitado à superfície do solo, geralmente nos primeiros 3-6 cm (Greenwood; McKenzie, 2001) ou até primeiros 20 cm (Hamza; Anderson, 2005).

Em um experimento de longa duração realizado na região do Cerrado, Marchão et al. (2007) analisaram as propriedades físicas do solo em sistemas de ILP comparados a métodos convencionais de cultivo, como plantio contínuo de lavoura e pastagem. Observaram que o pisoteio animal elevou a resistência à penetração e a densidade do solo, porém essas alterações não limitaram a produção das culturas anuais subsequentes. Além disso, verificaram que os sistemas de ILP, especialmente quando utilizados em conjunto com o sistema de plantio direto (SPD), contribuíram para maior armazenamento de água no solo.

De maneira similar, os resultados do ILPF-Corte sugerem que o pisoteio animal causou compactação do solo em todos os sistemas de pastejo em comparação à vegetação nativa (Valani et al., 2023). Apesar de a compactação ter ocorrido tanto nos sistemas integrados (ILP, IPF e ILPF) e não integrados (EXT e INT), vale ressaltar diversas vantagens dos sistemas integrados, incluindo: i) maior quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo (Tadini et al., 2021, 2022a, 2022b, 2022c); ii) menor evapotranspiração, aumentando a disponibilidade de água no solo (Bosi et al., 2020a, 2020b); iii) maior número de minhocas (Bruz et al., 2023); iv) melhor valor nutritivo das gramíneas (Pezzopane et al., 2019a); v) menores emissões de metano entérico em relação ao consumo de matéria seca (Meo-Filho et al., 2022); vi) melhor bem-estar animal e conforto térmico (Barreto et al., 2022; Lemes et al.,

2021; Pezzopane et al., 2019b); e vii) maior provisão de serviços ecossistêmicos (Valani et al., 2023).

6.2.3 Atributos biológicos

Uma ampla variedade de organismos é responsável por manter o solo produtivo e saudável. A composição da comunidade do solo é um fator-chave na regulação do funcionamento do ecossistema (Wagg et al., 2014). Esta biodiversidade do solo é fundamental para diferentes processos, como a ciclagem de nutrientes, formação de agregados, controle de pragas e doenças e sequestro de carbono (Brown et al., 2024; Food and Agriculture Organization, 2020). No entanto, as relações entre biodiversidade e função no solo são complexas e ainda não totalmente compreendidas. Há três mecanismos principais que podem explicar essas relações (Setälä et al., 2005): i) repertório, que exige a presença de organismos para realizar processo mediado biologicamente; ii) interações, em que organismos do solo influenciam uns aos outros positiva ou negativamente; e iii) redundância, que garante continuidade dos processos mesmo com a remoção de alguns organismos, pois os que permanecerem desempenharão a função.

Os fungos e bactérias geralmente representam mais de 90% da biomassa microbiana total do solo e são responsáveis pela maior parte da decomposição da matéria orgânica do solo. Portanto, a maior parte está inativa (dormente), esperando ser ativada pela presença de recursos (especialmente C lábil), e condições favoráveis de umidade e/ou temperatura (Kuzyakov; Blagodatskaya, 2015). A pesquisa sobre os organismos do solo em sistemas ILPF demanda avanços significativos, principalmente no que se refere à dinâmica populacional relacionada à incorporação de matéria orgânica, à liberação de nutrientes e ao armazenamento de carbono (Oliveira et al., 2024b; Valani et al., 2020).

A introdução do componente arbóreo pode estimular a diversidade microbiana, especialmente na conversão de pastagens solteiras para sistemas integrados. No sistema ILPF-Corte, a presença do eucalipto promoveu o aumento de novas interações na rizosfera, como a simbiose ectomicorrízica. Utilizando minirhizotrons para avaliar o crescimento e a decomposição de raízes finas de diferentes plantas em sistemas integrados, Bieluczyk et al. (2021) observaram que mais de 30% das raízes de eucalipto em diferentes distâncias das linhas de árvores apresentaram *status* micorrízico positivo (Figura 6.7). A colonização ectomicorrízica foi mais intensa nas distâncias intermediárias (4,3 m, com 52% de raízes micorrízicas) em comparação com as posições mais próximas das árvores (1,9 m, 30%) e mais afastadas (7,5 m, 30%). Os autores não registraram a presença de ectomicorrizas associadas às raízes da pastagem no sistema extensivo, nem às da cultura do milho ou da pastagem nos sistemas ILP ou ILPF. Esse resultado evidencia que a incorporação de árvores em sistemas integrados possui o potencial de promover benefícios emergentes no ambiente edáfico, ampliando a funcionalidade biológica da rizosfera. Uma dinâmica semelhante ao longo das entrelinhas das árvores foi observada para outros atributos biológicos, incluindo a β-glicosidase e a fosfatase ácida, em experimento conduzido em Votuporanga, São Paulo (Sarto et al., 2020). Ambas as enzimas apresentaram valores mais baixos sob as linhas simples de eucalipto espaçadas a 12 m, aumentaram em posições intermediárias da entrelinha (2 e 4 metros) e reduziram novamente na posição central entre as entrelinhas, já se assemelhando à pastagem sem a presença de árvores.

Embora Bessi et al. (2024) tenham registrado menor decomposição da matéria orgânica contida nos pacotes de chá (*tea bags*) nos sistemas com árvores (IPF e ILPF), em comparação com sistemas a pleno sol, como o sistema ILP, a dinâmica radicular observada no mesmo experimento (ILPF-Corte) foi bastante diversa. A introdução das árvores resultou em menor produção de raízes finas até 70 cm de profundidade ao longo de dois anos, sobretudo durante a fase lavoura, quando comparado ao sistema ILP (Bieluczyk et al., 2023, 2024). Ao mesmo tempo, os autores verificaram que a decomposição das raízes no sistema ILPF apresentou um *turnover* médio de 341 dias, consideravelmente menor do que na ILP, que foi de 520 dias. Portanto, a ILPF se caracterizou como um sistema de menor aporte radicular e maior velocidade de ciclagem de raízes em relação ao arranjo espaço-temporal equivalente sem árvores (ILP). Cabe destacar que ambos os sistemas, ILP e ILPF, produziram mais raízes do que a monocultura de pastagem extensiva sob manejo nominal.

A menor produção de raízes, associada à maior decomposição no ILPF em comparação ao ILP, indica a necessidade de um adequado aporte de material orgânico pela parte aérea, de forma a suprir as demandas de um agroecossistema mais dinâmico sob a presença

Biodiversidade do solo

Microrganismos: são a maioria absoluta dos habitantes do solo e exercem papel central em muitos processos ecológicos

- **Bactérias:** atuam na mineralização da matéria orgânica, oxidação-redução de compostos inorgânicos, solubilização ou precipitação de minerais, transformação de compostos orgânicos. Estão na base da regulação dos principais ciclos biogeoquímicos dos solos (carbono, nitrogênio, fósforo, enxofre...).

  Fungos: atuam como decompositores (saprofíticos), em associações simbióticas com as raízes das plantas (micorrizas), aumentando a absorção de água e nutrientes, na promoção do crescimento e a resistência a estresses abióticos na planta hospedeira (endofíticos), e também podem causar doenças nas plantas (patógenos).
- **Algas e protozoários:** contribuem para a agregação do solo e servem de alimento para outros organismos.

Microfauna: indivíduos geralmente menores que 200 µm, invisíveis a olho nu, que podem viver na porosidade capilar do solo.

- **Nematoides:** vivem na película de água que envolve as partículas do solo, podem ser predadores, parasitas de plantas ou consumidores de bactérias e fungos, e desempenham um papel fundamental na cadeia alimentar do solo. São conhecidas apenas 5% (aproximadamente 30 mil espécies) das espécies existentes.
- **Rotíferos e tardígrados:** também são encontrados em filmes de água e materiais orgânicos, como liquens e serapilheira. São essenciais para a cadeia alimentar da microfauna e microrganismos, sendo predadores de bactérias, amebas e, no caso dos tardígrados, nematoides.

Mesofauna: são animais com tamanho entre 0,2 mm e 4 mm, visíveis com o auxílio de uma lupa.

- **Colêmbolos:** são provavelmente o grupo de hexápodes mais abundante na Terra e têm alta diversidade, alimentam-se de fungos, bactérias e matéria orgânica em decomposição, encontrados principalmente no solo e serapilheira. Sua presença é um bom indicativo da saúde do solo.
- **Ácaros:** colonizam muitos habitats, especialmente aqueles ricos em material orgânico (serapilheira, etc.), contribuindo para a fragmentação do material orgânico, e podem ser predadores, parasitas (de plantas ou animais) ou decompositores.
  Também ocorrem, mas em menor abundância: Dipluros, Enquitreídeos, Miriápodes, Proturos, Tisanuros, pseudoescorpiões.

Macrofauna: são os maiores organismos do solo (entre 4 mm e 80 mm), facilmente visíveis a olho nu. Podem ser agrupados de acordo com seu modo de alimentação em predadores, decompositores, microbívoros, geófagos (alimentam-se do solo) e fitófagos. Inclui organismos que modificam o ambiente do solo por meio de suas atividades de bioturbação (formação de galerias, ninhos, coprólitos), que alteram a diversidade e a atividade microbiana.

- **Minhocas (Oligochaetas ou Crassiclitellatas):** consideradas as "engenheiras do solo", que criam galerias que melhoram a aeração e a infiltração de água. Alimentam-se de material orgânico, contribuindo com a decomposição e humificação da MOS. Podem ser: endógeas (geófagos que vivem nos primeiros centímetros do solo em uma rede de galerias horizontais); anécicas (saprófagos que vivem em galerias verticais permanentes no solo); epígeos (pequenas minhocas pigmentadas que vivem na serapilheira e geralmente não cavam galerias).
- **Formigas (Formicidae) e cupins (Isoptera):** são importantes detritívoros, também engenheiros do solo, suas colônias e túneis aumentam a porosidade do solo e misturam as camadas, transportando nutrientes.
- **Artrópodes:** aranhas (Araneae), tatuzinho-de-jardim (Isopoda), besouros (Coleoptera), centopeias (Chilopoda), gongôlos (Diplopoda) entre outros, adultos ou larvas, que atuam na fragmentação do material orgânico, facilitando a ação de microrganismos. Vários membros desse grupo são importantes pragas de lavouras, ou predadores de outros organismos.
- **Moluscos:** gastrópodes terrestres como caracóis e lesmas.

Raízes das plantas: também podem ser consideradas organismos do solo, pois têm relações simbióticas e interações com outros componentes do solo.

Fonte: Adaptado de Food and Agriculture Organization (2020) e Brown et al. (2024).

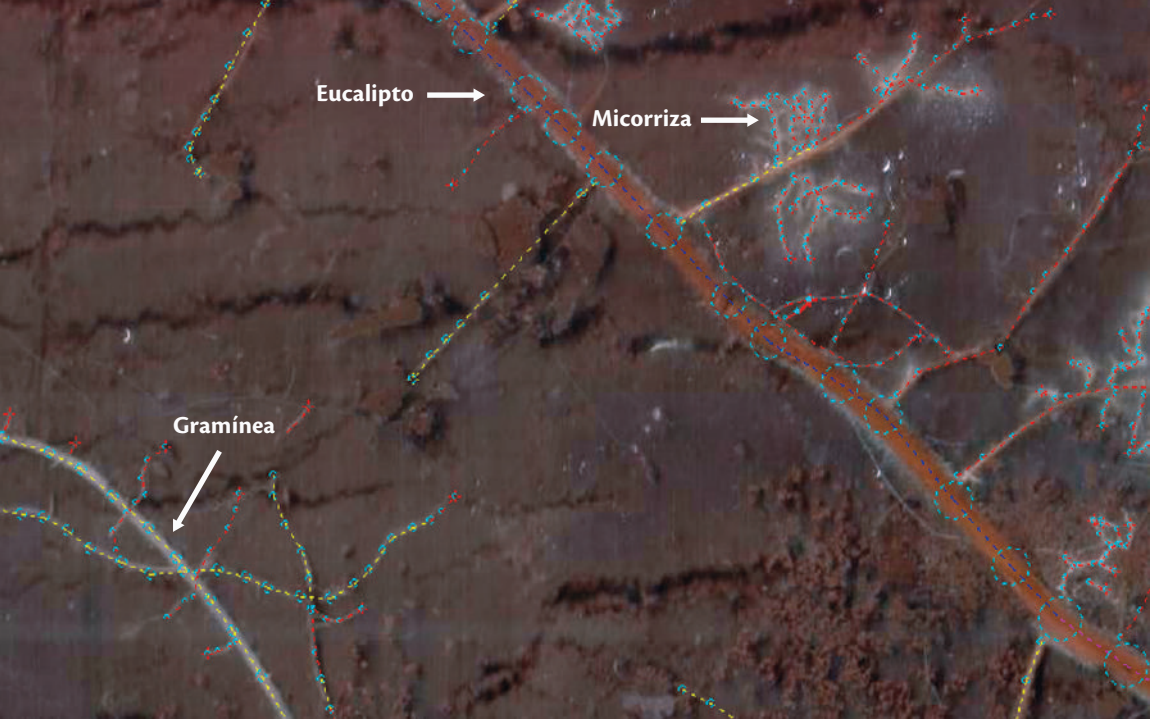


Figura 6.7. Imagens do sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) indicando os sistemas radiculares da gramínea, do eucalipto, e a colonização ectomicorrízica.
Fonte: Adaptado de Bieluczyk et al. (2021).

de árvores. No mesmo período de avaliação, entre três e cinco anos de idade das árvores de eucalipto, também foi observada menor produtividade de massa seca do milho e da pastagem no sistema com árvores. Esse efeito, similarmente ao verificado para as raízes, também foi mais intenso nas áreas próximas às fileiras de eucalipto, seguindo um padrão parabólico de restrição à pastagem e à cultura agrícola (Bosi et al., 2020b; Pezzopane et al., 2021). Segundo esses autores, a diminuição da biomassa aérea resultou de fatores como a menor transmissividade da radiação fotossinteticamente ativa e a menor disponibilidade de água nas áreas próximas aos renques, o que foi evidenciado nos estudos.

Essa competição reduziu a produtividade de biomassa do milho e da pastagem, tanto na parte aérea quanto no solo, o que refletiu em quantidades menores de MOS em frações lábeis, como a matéria orgânica leve e o carbono orgânico particulado (Bieluczyk et al., 2020). O conjunto desses resultados indicou a necessidade ajuste da densidade de árvores como medida para mitigar os efeitos adversos da competitividade. Logo em seguida, aos cinco anos de idade do eucalipto, metade das árvores foi cortada (Capítulo 3), modificando o arranjo de 15 × 2 m para 15 × 4 m. Essa intervenção alterou rapidamente a dinâmica do agroecossistema e possibilitou o restabelecimento de interações positivas na ILPF, inclusive nas áreas próximas aos renques, como discutido em outras seções deste capítulo.

Dessa forma, o monitoramento das raízes (indicador biológico) representou um avanço no entendimento da sustentabilidade do sistema ILPF-Corte e contribuiu para a definição de ajustes espaço-temporais necessários ao seu manejo. Os resultados evidenciaram como os sistemas agrícolas integrados interferem na dinâmica radicular, promovendo maior produção e decomposição de raízes, o que resulta em um ciclo mais rápido em comparação às pastagens extensivas (Bieluczyk et al., 2023, 2024). A ILPF, que integra culturas anuais, pastagens e árvores, configura o nível máximo de intensificação dos sistemas integrados. Nesse contexto, os diversos estudos conduzidos no experimento ILPF-Corte contribuíram significativamente para aprimorar os arranjos espaço-temporais atualmente recomendados, com o objetivo de maximizar a sinergia e minimizar a competição entre os componentes do sistema no sudeste do Brasil.

Neste mesmo sistema, a atividade microbiológica dos solos sob cultivo integrado foi maior que nos solos da vegetação natural de Mata Atlântica (Tadini et al.,

Indicadores biológicos

Biomassa microbiana: representa a soma de microrganismos vivos presentes no solo.

Respiração microbiana: produção de CO_2, que reflete o metabolismo microbiano no solo.

Quociente metabólico: é a razão entre a respiração microbiana e a biomassa microbiana, utilizado para indicar a eficiência dos microrganismos no uso do carbono e *status* do metabolismo microbiano.

Atividade enzimática: indicador relacionado a enzimas como fosfatases, arilsulfatases, glicosidades, celulases ou desidrogenases, envolvidas em processos funcionais do solo, como a ciclagem de C, N, S e P.

Diversidade microbiana: compreende a variedade de grupos taxonômicos e funcionais dos microrganismos presentes no solo, frequentemente acessada por métodos moleculares.

Presença de organismos da macro e mesofauna: riqueza, biomassa e abundância de indivíduos como minhocas, coleópteros e formigas, por exemplo.

Fonte: Adaptado de Food and Agriculture Organization (2020).

2022c), reforçando a elevada dinamicidade no ambiente edáfico. Utilizando técnica avançada de espectroscopia de ressonância magnética nuclear para caracterizar a estrutura do ácido húmico, o componente mais refratário da MOS, combinada com cromatografia gasosa e espectrometria de massas, observaram que a degradação de um composto orgânico (ácido esteárico) aumentou com a profundidade nos solos sob ILPF. Dessa forma, confirmaram indiretamente que esses solos eram mais microbiologicamente ativos do que o solo sob vegetação natural de referência. Os autores concluíram que a intensa atividade biológica favorece o sequestro de carbono, possivelmente pela diversidade de microrganismos na rizosfera do solo sob sistemas integrados. A introdução das árvores em sistemas de pastagens aumenta a diversidade funcional (Steinfeld et al., 2023), que se reflete em maior atividade enzimática em comparação com aquelas presentes em solos sob pastagem de monocultura (Santos et al., 2022).

As enzimas atuam como catalisadores essenciais nos processos vitais e, da mesma forma, exercem influência significativa no solo. A atividade enzimática do solo origina-se principalmente de microrganismos, manifestando-se como enzimas intracelulares ou livres (extracelulares). O equilíbrio entre fatores químicos, físicos e biológicos, particularmente as atividades enzimáticas microbianas, desempenha um papel distinto na manutenção da saúde do solo, pois relaciona-se aos processos funcionais de decomposição da matéria orgânica e mineralização de nutrientes. Áreas com atributos químicos semelhantes podem ter desempenho produtivo distinto de acordo com o manejo, devido a variações na atividade microbiológica. Solos produtivos e resilientes apresentam maiores valores de biomassa e respiração microbiana, e sobretudo de atividade enzimática (Mendes et al., 2018).

A tecnologia de análise BioAs, criada pela Embrapa, combina parâmetros biológicos (atividade de duas enzimas-chave ligadas ao ciclo do carbono e enxofre β-glicosidase e arilsulfatase) e atributos provenientes da análise química de rotina para compor índices de qualidade de solo (Mendes et al., 2018). Essa tecnologia é útil para avaliação de sistemas ILPF, já que a atividade enzimática no geral é mais sensível do que indicadores físicos e químicos isolados (Mendes et al., 2018), portanto, pode indicar precocemente a influência do sistema de manejo no solo.

A implementação de sistemas integrados, com componente animal e diversos componentes vegetais, leva a mudanças estruturais e composicionais nas comunidades microbianas, que se refletem na atividade dessas populações. Zago et al. (2020), avaliando sistemas ILPF com diferentes idades de implementação no Cerrado, verificaram aumento dos níveis enzimáticos ao longo do tempo, demonstrando a melhora na qualidade do solo com o tempo decorrido da implementação do sistema. Além disso, observaram que há uma distribuição espacial diferenciada na atividade enzimática, sendo que alguns tipos de enzimas, como a β-glicosidase, e sobretudo, aminopeptidase, tiveram maior atividade na linha de eucalipto, enquanto a fenoloxidase tem maior atividade nas entrelinhas de eucalipto, onde há maior abundância de gramíneas. Em avaliação da atividade enzimática de arilsulfatase

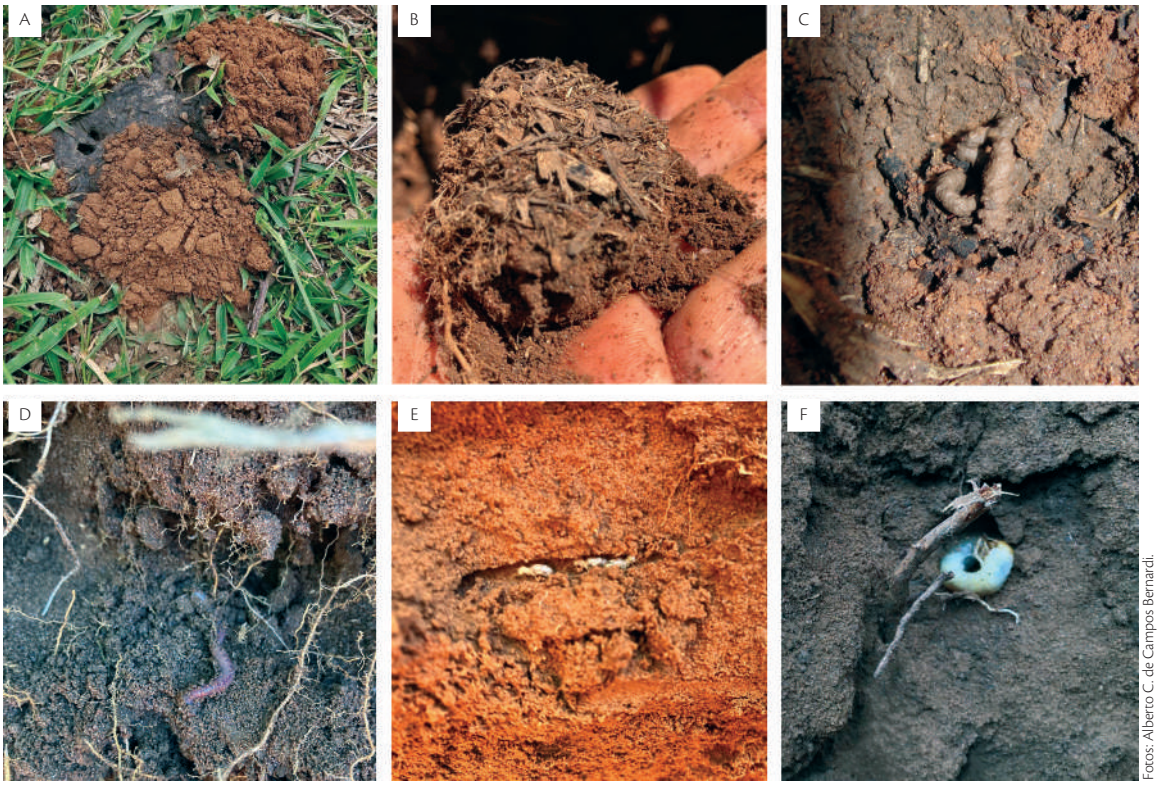
e β-glicosidase em sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste (SSP-Nativas), havia maior atividades enzimáticas nos sistemas integrados e pastagem manejada em relação à pastagem degradada, e a taxa de lotação também foi um fator determinante do nível enzimático no solo (Santos et al., 2022).

Franco et al. (2020) também verificaram melhoria na atividade enzimática em áreas de manejo integrado, comparadas a áreas de pastagem com uma única espécie. No início da implantação dos sistemas, ainda não houve resposta da biomassa e respiração microbiana de acordo com o manejo, mas as variações na atividade enzimática já eram perceptíveis, ressaltando a efetividade do indicador enzimático na detecção recente de alterações devido ao manejo.

Os sistemas de uso e preparo do solo também influenciam a estrutura das comunidades da macrofauna edáfica. A Figura 6.8 ilustra exemplos da atividade da macrofauna nos solos sob cultivo integrado na Embrapa Pecuária Sudeste.

Diferentes arquiteturas radiculares e a presença da fauna do solo (minhocas, microrganismos) melhoram a aeração, a infiltração de água e a resiliência do solo à erosão. Em sistemas de ILP com plantio direto e rotação gramíneas/leguminosas, houve o favorecimento das comunidades dos chamados "engenheiros do solo" como Oligochaetas, larvas de Coleoptera e de Diptera, em comparação com pastagens ou culturas anuais contínuas (Marchão et al., 2009).

As populações de minhocas são sensíveis ao manejo do solo, e úteis para avaliar os efeitos do ILPF na qualidade edáfica. No sistema ILPF-Corte, os tratamentos com árvores apresentaram maior biomassa de minhocas (Figura 6.9), quando comparados com sistemas convencionais, particularmente de pecuária intensiva e lavoura (Bruz et al., 2023). Os sistemas integrados contribuíram para o aumento da abundância de minhocas, além de promover a manutenção de espécies nativas e exóticas. Uma pesquisa recente realizada por Nadolny et al. (2020) constatou que a abundância de minhocas tende a ser maior em pastagens e em sistemas integrados de produção. Esse padrão provavelmente se deve ao maior aporte de nutrientes, à cobertura vegetal constante, à ausência de perturbações no solo e ao incremento da matéria orgânica — fatores que influenciam tanto a quantidade quanto a quali-



Fotos: Alberto C. de Campos Bernardi.

Figura 6.8. Registros da atividade biológica nos solos sob sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste.

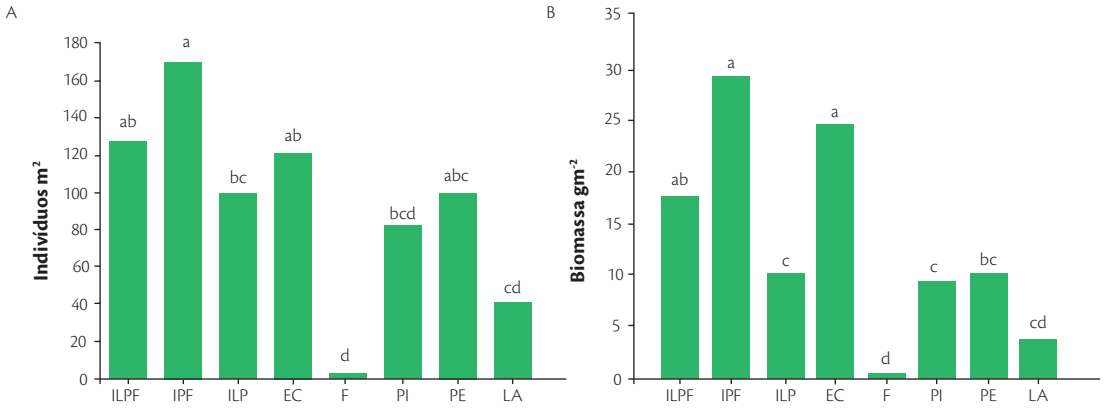


Figura 6.9. Abundância (ind m^{-2}) (A) e biomassa (g m^{-2}) (B) de minhocas em diferentes sistemas de produção (integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), integração pecuária-floresta (IPF), integração lavoura-pecuária (ILP), pastagem intensiva (PI), pastagem extensiva (PE), lavoura contínua (LA)), na floresta estacional semidecidual (F) na Fazenda Canchim, e em plantio de *Eucalyptus* (EC) na UFSCar, em São Carlos-SP.
Fonte: Adaptado de Bruz et al. (2023).

dade da serapilheira, afetando, por sua vez, a temperatura do solo (Curry, 2004). A riqueza de espécies foi superior na pastagem intensiva (Figura 6.10), seguida pelos sistemas ILPF e ILP, a presença da pastagem, associada ao aporte contínuo de matéria orgânica e à adubação nitrogenada, promove alta produtividade e o acúmulo de resíduos orgânicos, os quais são fundamentais para a manutenção de populações elevadas de minhocas. Apesar da predominância de espécies exóticas, duas espécies novas de minhocas foram encontradas (e recentemente descritas) nos sistemas integrados e nas pastagens da fazenda Canchim, evidenciando o papel relevante dos sistemas integrados e pastoris na conservação de minhocas, especialmente das espécies nativas (Bruz et al., 2023). Ambas pertencem aos dois gêneros de minhocas nativas (*Glossoscolex* e *Fimoscolex*) comumente encontrados nos solos agrícolas das regiões Sul e Sudeste do Brasil (Dudas, 2024). A presença de minhocas nativas em áreas amplamente perturbadas indica que o manejo adotado nas áreas da Embrapa tem favorecido a conservação dessas espécies. No entanto, é necessário que essas populações sejam monitoradas ao longo do tempo, a fim de garantir sua viabilidade e preservação.

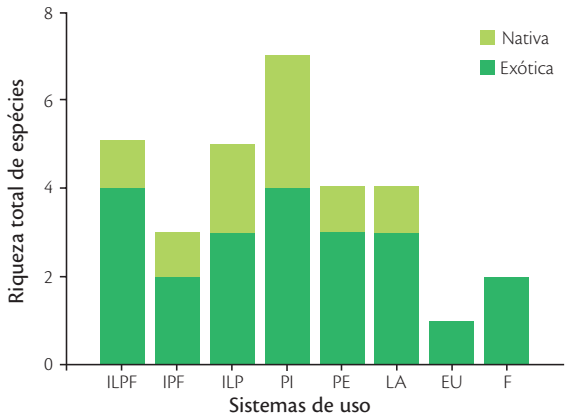


Figura 6.10. Riqueza total e número de espécies nativas e exóticas de minhocas nos diferentes sistemas de produção integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), integração pecuária-floresta (IPF), integração lavoura-pecuária (ILP), pastagem intensiva (PI), pastagem extensiva (PE), lavoura contínua (LA) e na floresta estacional semidecidual (F) na Embrapa Pecuária Sudeste, e em plantio de *Eucalyptus* (EC) na UFSCar, em São Carlos-SP.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo é um corpo natural organizado em camadas, com uma organização física de minerais e matéria orgânica, que resultou de processos químicos e biológicos. É um componente fundamental dos ecossistemas terrestres, sua localização, composição e processos que acontecem ali influenciam exercem um papel crítico em seu funcionamento e na sustentabilidade da vida humana. Além de garantir a produção de alimentos, fibras e energia, também provém serviços ambientais, como estoque de carbono, ciclagem de nutrientes, infiltração e armazenamento de água, e abrigo da biodiversidade. O manejo sustentável dos solos é o meio de garantir a segurança alimentar e de preservar os serviços essenciais dos ecossistemas e a biodiversi-

dade, e uma ferramenta valiosa para a adaptação e combate às emergências climáticas, além de ainda contribuir para a descarbonização, que é o processo de redução do carbono na atmosfera...

O manejo sustentável do solo é uma das principais ações para manutenção do potencial produtivo e da saúde do solo e dos ecossistemas. A integração lavoura-pecuária-floresta apresenta-se como um sistema de manejo integrado que promove melhoria de diversos indicadores de qualidade de solo. Neste capítulo, ressaltou-se que, para adequada avaliação dos sistemas integrados, uma abordagem sistêmica baseada nos diferentes tipos de indicadores (físicos, químicos e biológicos) é essencial. Os resultados apresentados destacam que o sistema ILPF tem potencial para promover melhoria da ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo, do acúmulo de carbono em superfície e também em profundidade no perfil, inclusive promovendo alterações na estabilidade da matéria orgânica quando comparado com o sistema intensivo. Parâmetros físicos, como a condutividade hidráulica, apresentam melhoria no ILPF em comparação à pastagem extensiva e monocultivos. Devido à diversificação de espécies, há melhoria na quantidade de organismos e atividade microbiana, destacando-se o parâmetro de atividade enzimática como altamente sensível para demonstrar essas mudanças.

Destaca-se também que ainda há questões a serem elucidadas com relação aos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, considerando as várias possibilidades de combinação de espécies componentes, de intensidades de pastejo e práticas de manejo dos cultivos, já que a eficácia do sistema para eficiência produtiva e captura de carbono varia conforme as combinações e práticas utilizadas. Portanto, a otimização do equilíbrio entre os componentes do ILPF para maximizar o sequestro de carbono deve ser explorada em detalhe. Assim, pesquisas futuras devem focar em práticas de manejo que otimizem o sequestro de carbono sem comprometer a produtividade agrícola.

6.4 REFERÊNCIAS

ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services: a global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101-111, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009.

ALMEIDA, T. F.; CARVALHO, J. K.; REID, E.; MARTINS, A. P.; BISSANI, C. A.; BORTOLUZZI, E. C.; BRUNETTO, G.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; TIECHER, T. Forms and balance of soil potassium from a long-term no-till integrated crop-livestock-silviculture system. **Soil & Tillage Research, Amsterdam**, v. 206, p. 104778, 2021.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtrópico brasileiro. **Tópicos Especiais em Ciência do Solo**, v. 8, p. 221-278, 2013.

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic Soil Fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0210090, 2021. DOI: http://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210090.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J. Physical attributes of soil in integrated crop-livestock-forest systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316.

ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. O.; NICHEL, G. H.; COSTA, S. E. V. G. A.; SILVA, R. A. P.; BALERINI, F.; CARVALHO, P. C. F.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 21-33, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/s10705-016-9818-6.

BABOS, D. V.; TADINI, A. M.; DE MORAIS, C. P.; BARRETO, B. B.; CARVALHO, M. A. R.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) as an analytical tool in precision agriculture: Evaluation of spatial variability of soil fertility in integrated agricultural production systems. **Catena**, v. 239, n. 107914, p. 107914, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107914.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 7-8, p. 921-950, 2001. DOI: http://doi.org/10.1081/CSS-100104098.

BARRETO, A.; BARIONI JUNIOR, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; PEDROSO, A. F.; MARCONDES, C. R.; JACINTHO, M. A. C.; ROMANELLO, N.; SOUSA, M. A. P.; NANNI COSTA, L.; GARCIA, A. R. Thermal comfort and behavior of beef cattle in pasture-based systems monitored by visual observation and electronic device. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 253, n. 105687, p. 105687, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105687.

BATEY, T. Soil compaction and soil management: a review. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 4, p. 335-345, 2009. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x.

BENITES, V. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MACHADO, P. L. O. A.; POLIDORO, J. C.; TEIXEIRA, R. S. Insights into brazilian soils and sustainable agriculture scenarios. In: SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **The soils of Brazil**. Cham: Springer, 2023. p. 471-486. (World Soils Book Series).

BERNARDI, A. C. de C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. de F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, J. R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 13, n. 4, p. 290-300, 2019. DOI: https://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n4p290-300.

BERNARDI, A. C. C.; TADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; MARTIN NETO, L. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical.** Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 569-600.

BESSI, D.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; TANAKA, M. O. Decomposition and stabilization of the organic matter in integrated livestock production systems. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 1, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01044-0.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; DE MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; DE CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 371, n. 15, p. 114368, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; CHERUBIN, M. R. Eucalyptus tree influence on spatial and temporal dynamics of fine root growth in an integrated crop livestock forestry system in southeastern Brazil. **Rhizosphere**, v. 1, n. 9, p. 100415, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100415.

BIELUCZYK, W.; BONETTI, J. A.; DENARDIN, L. G. O.; PIRES, G. C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. Manejo integrado para a sustentabilidade de sistemas integrados de produção agropecuária. In: MARTINS, A. G.; BATISTA, A. H.; WENDING, B.; PEREIRA, G. P.; SANTOS, W. O. (ed.). **Manejo do solo em sistemas integrados de produção**. Ponta Grossa, PR: Atena, 2022. p. 80-128.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; GERMON, A.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; CAMARGO, P. B.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Fine root dynamics in a tropical integrated crop-livestock-forestry system. **Rhizosphere**, v. 26, n. 100695, p. 100695, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100695.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M.; GONÇALVES, J. V. M.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; CAMARGO, P. B.; TAVARES, T. R.; GERMON, A.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; CHERUBIN, M. R.; MORAES, M. T. Fine root production and decomposition of integrated plants under intensified farming systems in Brazil. **Rhizosphere**, v. 31, n. 100930, p. 100930, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100930.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Silvopastoral system with eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. e20180425, 2020a. DOI: http://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 429-440, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-019-00402-7.

BOUMA, J. Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 177, n. 2, p. 111-120, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/jpln.201300646.

BRÁZ, S. P.; NASCIMENTO JUNIOR, D. N.; CANTARUTTI, R. B.; MARTINS, C. E.; FONSECA, D. M.; BARBOSA, R. A. Caracterização da distribuição espacial das fezes por bovinos em uma pastagem de *Brachiaria decumbens*. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 4, p. 787-794, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982003000400002.

BROWN, G. G.; DEMETRIO, W.; GABRIAC, Q.; PASINI, A.; KORASAKI, V.; OLIVEIRA, L.; DOS SANTOS, J.; TORRES, E.; GALERANI, P.; GAZZIERO, D.; BENITO, N.; NUNES, D.; SANTOS, A.; FERREIRA, T.; NADOLNY, H.; BARTZ, M.; MASCHIO, W.; DUDAS, R.; ZAGATTO, M.; NIVA, C.; CLASEN, L.; SAUTTER, K.; FROUFE, L.; SEOANE, C. E.; DE MORAES, A.; JAMES, S.; ALBERTON, O.; BRANDÃO JÚNIOR, O.; SARAIVA, O.; GARCIA, A.; OLIVEIRA, E.; CÉSAR, R.; CORRÊA-FERREIRA, B.; BRUZ, L.; SILVA, E.; CARDOSO, G.; LAVELLE, P.; VELÁSQUEZ, E.; CREMONESI, M.; PARRON, L.; BAGGIO, A.; NEVES, E.; HUNGRIA, M.; CAMPOS, T.; DA SILVA, V.; REISSMANN, C.; CONRADO, A.; BOUILLET, J. -P.; GONÇALVES, J.; BRANDANI, C.; VIANI, R.; PAULA, R.; LACLAU, J. -P.; PEÑA-VENEGAS, C.; PERES, C.; DECAËNS, T.; PEY, B.; EISENHAUER, N.; COOPER, M.; MATHIEU, J. Soil macrofauna communities in Brazilian land-use systems. **Biodiversity Data Journal**, v. 12, p. e115000, 2024. DOI: http://doi.org/10.3897/BDJ.12.e115000.

BRUZ, L. S. M.; SANTOS, A.; DEMETRIO, W. C.; PRIMO, D. F.; FELICIANO, L. P.; FERNANDES, C. H.; BARTZ, M. L. C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BROWN, G. G. Earthworms in various agricultural and forest ecosystems in São Carlos-SP, Brazil. **Zootaxa**, v. 5255, n. 1, p. 324-335, 2023. DOI: http://doi.org/10.11646/zootaxa.5255.1.26.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality: a critical review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

CARNEVALLI, R. A.; MELLO, A. C. T.; SHOZO, L.; CRESTANI, S.; COLETTI, A. J.; ECKSTEIN, C. Spatial distribution of dairy heifers' dung in silvopastoral systems. **Ciência Rural**, v. 49, n. 10, p. e20180796, 2019. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180796.

CARPINELLI, S.; DA FONSECA, A. F.; WEIRICH NETO, P. H.; DIAS, S. H. B.; PONTES, L. S. Spatial and temporal distribution of cattle dung and nutrient cycling in integrated crop–livestock systems. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 672, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy10050672.

CARVALHO, M. A. R.; TADINI, A. M.; SILVA, K. S. G.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN NETO, L. Determinação de carbono em solos sob sistemas integrados de produção através da técnica fotônica Laser Induced Breakdown Spectroscopy – LIBS. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. **Ciência, inovação e mercado: anais**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019.

CORTNER, O.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; FERREIRA, J.; NILES, M. T.; REIS, J.; GIL, J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 82, p. 841-853, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.006.

CURRY, J. P. Factors affecting the abundance of earthworms in soils. In: EDWARDS, C.A. (ed.). **Earthworm ecology**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. p. 91-113. DOI: http://doi.org/10.1201/9781420039719.pt3.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 3-11, 2000. DOI: http://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6.

DUDAS, R. T. Earthworm biodiversity and their role as bioindicators in different land use systems and Brazilian biomes. 2024. 179 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) — Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **State of knowledge of soil biodiversity**: status, challenges and potentialities. Rome: FAO, 2020. 583 p.

FARIAS, G. D.; BREMM, C. ; LEMAIRE, G. ; ASSMANN, T. S.; SIMÕES, V. J. L. P.; TIECHER, T. ; ALVES, L. A.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C .F. Can system fertilization improve plant nutrition and ensure nutrient carryover to crops. **Field Crops Research**, v. 318, e113436, 2025.

FERNANDES, K. L.; RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J.; CUSTÓDIO, G. D.; BARROS, L. R. Influence of time management in modeling of curve resistance to the penetration of a Latosol under different uses and management of pastures and native woodland. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 519-527, 2016. DOI: http://doi.org/10.1590/0100-67622016000300015.

FERREIRA, L. C. B.; MACHADO FILHO, L. C. P.; HOETZEL, M. J.; LABARRÊRE, J. G. O efeito de diferentes disponibilidades de sombreamento na dispersão de fezes dos bovinos nas pastagens. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 6, p. 137-146, 2011.

FRANCO, A. J. J.; SILVA, A. P. V.; SOUZA, A. B. S.; SILVA, A. O.; CARNEIRO, M. A. C. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e64026, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/1983-40632020v5064026.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002. DOI: http://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00018-1.

GAMA, J. T. The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: challenges and opportunities. **Ecologies**, v. 4, n. 3, p. 552-567, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/ecologies4030036.

GERKE, H. H. Preferential flow descriptions for structured soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, n. 3, p. 382-400, 2006. DOI: http://doi.org/10.1002/jpln.200521955.

GREENWOOD, K. L.; MCKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 8, p. 1231-1250, 2001. DOI: http://doi.org/10.1071/EA00102.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009.

HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A. B. Defining 'soil science'. **Soil Security**, v. 18, p. 100176, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100176.

HAYATI, D.; RANJBAR, Z.; KARAMI, E. Measuring agricultural sustainability. In: LICHTFOUSE, E. (ed.), **Biodiversity, biofuels, agroforestry and conservation agriculture**. Amsterdam: Springer. 2010. p. 73-100. (Sustainable Agriculture Reviews, 5). DOI: http://doi.org/10.1007/978-90-481-9513-8_2

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in Agronomy**, v. 49, p. 119-199, 1993. DOI: http://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60794-4.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 2013. 413 p.

KARLEN, D. L.; VEUM, K. S.; SUDDUTH, K. A.; OBRYCKI, J. F.; NUNES, M. R. Soil health assessment: past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil & Tillage Research**, v. 195, p. 104365, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004. DOI: http://doi.org/10.1126/science.1097396.

LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v. 5, n. 4, p. 212-222, 2016. DOI: http://doi.org/10.1002/fes3.96.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (ed.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 37-51. (Special, 35). DOI: http://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c3.

LEMES, A. P.; GARCIA, A. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRANDÃO, F. Z.; WATANABE, Y. F.; COOKE, R. F.; SPONCHIADO, M.; DE PAZ, C. C. P.; CAMPLESI, A. C.; BINELLI, M.; GIMENES, L. U. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-17, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s41598-021-93609-7.

LUO, L.; LIN, H.; SCHMIDT, J. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 6, p. 1929-1937, 2010. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj2010.0062.

NADOLNY, H.; SANTOS, A.; DEMETRIO, W. C.; FERREIRA, T.; MAIA, L. D. S.; CONRADO, A. C.; BARTZ, M.; GARRASTAZU, M.; SILVA, E. D.; LAVELLE, P.; BARETTA, D.; PASINI, A.; VEZZANI, F.; SOUSA, J. P.; CUNHA, L.; MATHIEU, J.; RÖMBKE, J.; BROWN, G. Recommendations for assessing earthworm populations in Brazilian ecosystems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. 01006, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.01006.

MADARI, B. E.; MATOS, P. S.; OLIVEIRA, J. M.; CARVALHO, M. T. M.; SILVEIRA, A. L. R.; MACHADO, P. L. O. A.; ARAUJO, W. A.; SIQUEIRA, M. M. B.; FERRARESI, T. M.; FREITAS, F. M. C.; RIZZO, P. V.; SILVA, R. R.; PACHECO, A. R. Soil carbon stock changes in a crop-livestock-forestry integration in Southern Goiás State, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2141-2156, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01056-w.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600015.

MARCHÃO, R. L.; LAVELLE, P.; CELINI, L.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 8, p. 1011-1020, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800033.

MARCHÃO, R. L.; MENDES, I. C.; VILELA, L.; JÚNIOR, R. G.; NIVA, C. C.; PULROLNIK, K.; SOUZA, K. W.; DE CARVALHO, A. M. Integrated Crop–Livestock–Forestry systems for improved soil health, environmental benefits, and sustainable production. In: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (ed.). **Soil health and sustainable agriculture in Brazil**. Nova York: SSSA; London: Willy, 2024. v. 3, p. 19–61. DOI: http://doi.org/10.1002/9780891187448.ch2.

MARTHA JÚNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, 2012. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001.

MCBRATNEY, A. B.; HARTEMINK, A. E. Define soil. **Soil Security**, v. 14, p. 100135, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100135.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JÚNIOR, F. B.; LOPES, A.A.C. **Bioanálise de solo**: como acessar e interpretar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018. (Circular Técnica, 382).

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest Biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVESI, O. M. A. Serviços ambientais em sistemas silvipastoris. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2019. cap. 10, p.141-153. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1112746. Acesso em 29 out. 2025.

NOGUCHI, S.; NIK, A. R.; KASRAN, B.; TANI, M.; SAMMORI, T.; MORISADA, K. Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia. **Journal of Forest Research**, v. 2, n. 2, p. 115-120, 1997. DOI: http://doi.org/10.1007/BF02348479.

NOGUCHI, S.; TSUBOYAMA, Y.; SIDLE, R. C.; HOSODA, I. Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1413-1423, 1999. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351413x.

OENEMA, O.; KROS, H.; DE VRIES, W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 1-2, p. 3-16, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00067-4.

OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; LIMA, M. L.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 1, p. 105-116, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s10113-017-1146-0.

OLIVEIRA, D. M.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: a review. **Geoderma Regional**, v. 37, p. e00796, 2024a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic Forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, n. 127219, p. 127219, 2024b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; DE FARIA PEDROSO, A.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v.

93, n. 1, p. 39-49, 2019a. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, n. 107350, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

QU, X.; BARDGETT, R. D.; KUZYAKOV, Y.; REVILLINI, D.; SONNE, C.; XIA, C.; RUAN, H.; LIU, Y.; FULIANG, C.; REICH, P. B.; DELGADO-BAQUERIZO, M. Deforestation impacts soil biodiversity and ecosystem services worldwide. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 121, n. 13, p. e2318475121, 2024. DOI: http://doi.org/10.1073/pnas.2318475121.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres; Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.

ROCHA JUNIOR, P. R.; STURIÃO, W. P.; NOGUEIRA, N. O.; PASSOS, R. R.; DONAGEMMA, G. K.; RANGEL, O. J. P.; BHATTARAI, R. Soil quality indicators to evaluate environmental services at different landscape positions and land uses in the Atlantic Forest biome. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 7, p. 100047, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100047.

SÁ, J. C. M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; FACCIO-CARVALHO, P. C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENCO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023.

SANTOS, J. V.; BENTO, L. R.; BRESOLIN, J. D.; FOSCHINI, M. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; MENDES, I. C.; MARTIN NETO, L. The long-term effects of intensive grazing and silvopastoral systems on soil physicochemical properties, enzymatic activity, and microbial biomass. **Catena**, v. 219, n. a106619, p. 106619, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106619.

SARTO, M. V.; BORGES, W. L.; SARTO, J. R.; PIRES, C. A.; RICE, C. W.; ROSOLEM, C. A. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, p. 103350, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.012.

SETÄLÄ, H.; BERG, M. P.; JONES, T. H. Trophic structure and functional redundancy in soil communities. In: BARDGETT, R. D.; HOPKINS, D. W.; USHER, M. B. **Biological diversity and function in soils**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 236-249.

SIDLE, R. C.; NOGUCHI, S.; TSUBOYAMA, Y.; LAURSEN, K. A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 10, p. 1675-1692, 2001. DOI: http://doi.org/10.1002/hyp.233.

SOBRAL, L. F.; BARRETO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 15 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 206).

SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 9-17, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012.

STEINFELD, J. P.; BIANCHI, F. J. J. A.; LOCATELLI, J. L.; RIZZO, R.; RESENDE, M. E. B.; BALLESTER, M. V. R.; CERRI, C. E. P.; BERNARDI, A. C. C.; CREAMER, R. E. Increasing complexity of agroforestry systems benefits nutrient cycling and mineral-associated organic carbon storage, in south-eastern Brazil. **Geoderma**, v. 440, pp. 116726, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116726.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil & Tillage Research**, v. 211, n. e105001, p. 105001, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2021.105001.

TADINI, A. M.; BERNARDI, A. C. C.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MARTIN NETO, L. Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. **Geoderma Regional**, v. 28, n. e00476, p. e00476, 2022a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00476.

TADINI, A. M.; GORANOV, A. I.; MARTIN NETO, L.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; HATCHER, P. G. Structural characterization using 2D NMR spectroscopy and TMAH-GC × GC-MS: application to humic acids from soils of an integrated agricultural system and an Atlantic native forest. **The Science of the Total Environment**, v. 815, p. 152605, 2022b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152605.

TADINI, A. M.; MARTIN NETO, L.; GORANOV, A. I.; MILORI, D. M. B. P.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; COLNAGO, L. A.; HATCHER, P. G. Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13136, 2022c. DOI: http://doi.org/10.1111/ejss.13136.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; DA SILVA, L. F. S.; BOVI, R. C.; COOPER, M. Soil quality assessments in integrated crop-livestock-forest systems: a review. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 1, 2020. DOI: http://doi.org/10.1111/sum.12667.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil & Tillage Research**, v. 220, p. 105357, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; COOPER, M.; MACKAY, A.; DOMINATI, E. Condition of the soil resource and provision of ecosystem services from a Brazilian Oxidic soil under conventional and integrated livestock-based systems. **Journal of New Zealand Grasslands**, v. 85, p. 73-82, 2023. DOI: http://doi.org/10.33584/jnzg.2023.85.3656.

VALANI, G. P. **Qualidade física do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta**. 2024. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024. DOI: http://doi.org/10.11606/T.11.2024.tde-05112024-153823.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; MACHADO, C. B.; DUARTE, D. A.; BRITO, M. F. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; COOPER, M. Soil porosity in integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol assessed by 3D X-ray computed tomography. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 237, p. 110557, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110557.

VAN LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I.; PINHEIRO, E. A. R. A física do solo baseada em processos. In: SOUZA FILHO, L. F.; SILVA, R. C.; CÉSAR, F. R. C. F.; SOUZA, C. M. M. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2021. v. 11.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001.

WAGG, C.; BENDER, S. F.; WIDMER, F.; VAN DER HEIJDEN, M. G. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 14, p. 5266-5270, 2014. DOI: http://doi.org/10.1073/pnas.1320054111.

ZAGO, L. M. S. Z.; RAMALHO, W. P.; SILVA-NETO, C. M.; CARAMORI, S. S. Biochemical indicators drive soil quality in integrated crop-livestock-forestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2249-2260, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-020-00547-w.

ZHAO, F.; YANG, B.; ZHU, X.; MA, S.; XIE, E.; ZENG, H.; LI, C.; WU, J. An increase in intercropped species richness improves plant water use but weakens the nutrient status of both intercropped plants and soil in rubber–tea agroforestry systems. **Agricultural Water Management**, v. 284, n. 108353, p. 108353, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108353.

Capítulo 7

Produção Vegetal: Árvores, Pastagens e Culturas Anuais

Henrique Bauab Brunetti, José Ricardo Macedo Pezzopane, Cristiam Bosi, Rolando Pasquini Neto, Patrícia Perondi Anchão Oliveira, André de Faria Pedroso, Alberto Carlos de Campos Bernardi



RESUMO: Em sistemas integrados de produção agropecuária, a interação entre os componentes altera significativamente o padrão produtivo. Nos experimentos de integração lavoura-pecuária-floresta da Embrapa Pecuária Sudeste, a quantificação da produção dos componentes vegetais (árvores, culturas anuais e pastagens) e das alterações microclimáticas tem permitido compreender com precisão as interações ao longo do desenvolvimento desses sistemas. Os resultados abrangem diferentes condições ambientais, com ênfase na transmissão de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), considerando sua variabilidade espaço-temporal, o tempo de implantação dos sistemas e o manejo e distância das culturas sombreadas em relação às árvores. No milho para silagem no ILPF-Corte, o desbaste aumentou a entrada de luz, resultando em produtividades similares às de áreas a pleno sol. Para a aveia-preta no SSP-nativas, a proximidade das árvores reduziu a RFA e a produtividade. Em pastagens tropicais, verificou-se que a transmissão de RFA deve ser mantida acima de 65% para igualar a biomassa à de áreas a pleno sol. Em latitudes mais altas, o plantio no sentido leste-oeste favorece transmissões elevadas de RFA no verão, explorando o potencial produtivo das pastagens, enquanto no período seco o crescimento é limitado por temperaturas baixas e déficit hídrico. Adicionalmente, sob sombreamento moderado, observou-se incremento no teor de proteína bruta. Até oito anos de implantação das árvores no ILPF-Corte (segundo desbaste), a biomassa total média foi de 144,7 Mg ha^{-1}. No corte final registrou-se produção média de 298,6 m^3 ha^{-1} de madeira no tronco e biomassa total média de 211 Mg ha^{-1}, evidenciando elevado potencial produtivo do componente arbóreo.

Palavras-chave: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta; Integração Lavoura-Pecuária; Sistema Silvipastoril; Urochloa, Milho, Eucalipto; Árvores Nativas.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-7

ABSTRACT: Within Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLFS) systems, the interaction between components fundamentally alters the productive pattern. In the ICLFS experiments conducted at Embrapa Pecuária Sudeste, quantifying plant component production (trees, annual crops, and pastures) alongside microclimatic variations has enabled a precise understanding of component interactions throughout the development of these systems. The findings encompass diverse environmental conditions, with particular emphasis on Photosynthetically Active Radiation (PAR) transmission, considering its spatio-temporal variability, the timing of system implementation, and the management and distance of shaded crops relative to the trees. In silage corn grown within the ICLFS-Beef system, thinning significantly increased light penetration, leading to productivity comparable to that observed in full-sun areas. Conversely, for black oats in the Silvopastoral System (SPS) with native trees, proximity to the trees reduced both PAR and crop productivity. For tropical pastures grown under a canopy, PAR transmission must remain above 65% to achieve biomass production equivalent to that in full-sun areas. At higher latitudes, orienting tree rows east-west maximizes PAR transmission during the summer, thereby exploiting the full productive potential of the pastures. However, during the dry season, pasture growth is inherently limited by low temperatures and water deficit. Additionally, under moderate shading, the crude protein content in the forage increased. Up to eight years post-tree establishment in the ICLFS-Beef system (following the second thinning), the average total biomass reached 144,7 Mg ha^{-1}. At the final harvest, an average wood production of 298,6 m^3 ha^{-1} (in the trunk) and an average total biomass of 211 Mg ha^{-1} were recorded, clearly demonstrating the high productive potential of the forestry component.
Keywords: Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF); Integrated Crop-Livestock (ICL); Silvopastoral System; Urochloa, Maize, Eucalyptus; Native Trees.

7.1 INTRODUÇÃO

Sistemas integrados de produção são considerados alternativas sustentáveis para a diversificação de cultivos vegetais em uma mesma área, tornando o uso da terra mais eficiente, provisionando diversos serviços ecossistêmicos e podendo trazer sinergias entre os componentes cultivados. Nesse contexto, esses sistemas têm ganhado destaque como alternativa sustentável de intensificação de sistemas agropecuários (Pezzopane et al., 2019a). Dentre as modalidades de sistemas integrados, destacam-se os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e sistemas silvipastoris (SSP), que integram árvores, cultivos agrícolas, animais e pastagens em uma mesma área.

Quando bem manejados, os ILPFs e SSPs podem apresentar, quando comparados a sistemas a pleno sol, maior fertilidade do solo, devido à maior diversidade de matéria orgânica e microbiota do solo; forragens com maior teor de proteína bruta e digestibilidade, em razão da maior fertilidade do solo e de modificações nas células vegetais; e produtividade de pastagens similares, devido a adaptações morfofisiológicas nos vegetais (Brunetti et al., 2022). Por outro lado, a presença de árvores altera a quantidade e qualidade da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), e a quantidade de água disponível e nutrientes para forragens e culturas agrícolas, podendo, dependendo da magnitude dessas alterações, diminuir significativamente a quantidade e qualidade de biomassa vegetal produzida (Pasquini Neto et al., 2024).

Nesse contexto, o sucesso de sistemas integrados depende do conhecimento e manejo estratégico de cada espécie vegetal adotada no sistema. O desafio demanda entendimento específico de cada componente do sistema para que cada deles tenha a produtividade mínima necessária para ser viável, ao mesmo tempo que requer entendimento das complexas interações entre os componentes e visão holística, considerando a produtividade do sistema adotado como um todo (i.e., considerando a soma das produtividades dos componentes e os retornos econômicos e ambientais advindos delas). Neste capítulo, as interações entre os componentes vegetais e suas consequências são exploradas com base em sistemas integrados conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste.

7.2 PRODUÇÃO VEGETAL NOS EXPERIMENTOS DE SISTEMAS INTEGRADOS NA EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE

7.2.1 Culturas anuais

7.2.1.1 Milho (*Zea mays* L.) no experimento ILPF-Corte

Durante a Fase 1 do sistema ILPF-Corte (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), houve renovação das pastagens com plantio de milho para ensilagem em simultâneo com o capim-piatã nas safras de 2013/14 e

2014/15. Pezzopane et al. (2019a) compararam quatro pontos do sistema ILPF (1,5 m; 3,75 m; 7,5 m e 11,25 m distante do renque norte) com um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), que também foi renovado utilizando o mesmo híbrido de milho e manejo. Os autores registraram menor produtividade de milho nos pontos ILPF-1,5 m e ILPF-3,75 m durante as duas safras, mas não observaram diferenças significativas nos outros pontos (Tabela 7.1).

Na primeira safra no ponto ILPF-1,5 m, a produtividade do milho foi limitada pela baixa transmissão de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) para o dossel de milho (39,7%), enquanto no ponto ILPF-3,75 m, onde a transmissão de RFA foi de 89,5%, o resultado é decorrente de veranico que ocorreu durante o crescimento do milho e aumentou os efeitos da competição hídrica entre as árvores e o milho em pontos próximos às árvores. Os autores obtiveram a razão entre a evapotranspiração real (ETa) e a de referência (ET0) de 0,77 durante toda a safra, e 0,62 especificamente nos períodos pós-floração e enchimento de grãos, indicando deficiência hídrica em períodos críticos do desenvolvimento do milho. O milho apresenta elevada sensibilidade ao estresse hídrico durante o período de polinização e fertilização. Autores como Nielsen (2002) e Kim e Lee (2023) ressaltam que a ocorrência de estresse hídrico nas duas semanas que antecedem a polinização e durante o desenvolvimento de estigmas e grãos de pólen resultam em perdas de rendimento de até 8% ao dia, dependendo da intensidade do estresse, em função de ressecamento das estruturas e a sincronia entre a liberação do pólen e a emissão dos estigmas. Vale ressaltar que o balanço hídrico climatológico não diferencia o estresse hídrico sofrido pelo milho nos diferentes pontos, e, nesse contexto, o estresse hídrico em plantas próximas ao renque de árvores foi, provavelmente, ainda maior do que o estimado pelo índice.

Na segunda safra, considerando a média das posições avaliadas no ILPF, a produção de MS do milho foi 64,7% maior em relação à primeira safra (9816,7 *vs.* 5266,1 kg ha^{-1}), enquanto no ILP a segunda safra foi 67% maior quando comparada com a primeira (Tabela 7.1). Essas diferenças foram consequência da boa disponibilidade hídrica (índice de disponibilidade hídrica durante toda a safra = 0,95) na segunda safra, quando comparada à primeira. No entanto, as diferenças de produtividade e proporção de grãos entre os pontos ILPF-1,5 m e ILPF-3,75 m em relação ao ILP persistiram devido à baixa transmissão de RFA, que foram iguais a 44,6% e 67,8% nos pontos ILPF-1,9 m e ILPF-3,75 m, respectivamente. O aumento em altura das árvores e elevação da copa delas aumentou levemente a transmissão de RFA no ponto ILPF-1,5 m em relação à primeira safra, enquanto o crescimento da copa como um tudo diminuiu significativamente a transmissão de RFA no ponto ILPF-3,75 m (Pezzopane et al., 2019a). Em condições favoráveis de disponibilidade hídrica, diversos autores observaram maiores produtividades nas regiões centrais

Tabela 7.1. Produtividade e proporção de grãos de milho para ensilagem em um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e em quatro posições (ILPF_1: 1,9 m; ILPF_2: 3,75 m; ILPF_3: 7,50 m; e ILPF_4: 11,25 m distante do renque norte de árvores), em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) durante as safras de 2013/14, 2014/15 e 2016/2017.

Tratamento	Variável			
	Produtividade (kg MS ha^{-1})			
	2013/14[1]	**2014/15[1]**	**Média**	**2016/17[2]**
ILP	8063,2	12100,8	10082 a	13,1 a
ILPF-1,5/1,9	4251,5	6570,9	5411,2 c	12,8 a
ILPF-3,75	4553,9	9993,1	7273,5 b	14,0 a
ILPF-7,5	6413,9	11606,9	9010,4 ab	13,9 a
ILPF-11,25	5845,1	11096,0	8470,5 ab	14,1 a
Média	5825,5	10273,5	8049,5	13,6
	Proporção de grãos (%)			
	2013/14[1]	**2014/15[1]**	**Média**	**2016/17[2]**
ILP	16,21 a	28,52 b	22,37	35,26 b
ILPF-1,5/1,9	7,11 b	28,24 b	17,68	37,95 ab
ILPF-3,75	11,47 ab	34,32 ab	22,90	40,98 a
ILPF-7,5	14,46 a	41,40 a	27,93	40,06 a
ILPF-11,25	16,21 ab	37,41 a	26,81	41,33 a
Média	13,09	33,98	23,54	39,12
	Proteína bruta (%)			
				2016/17[2]
ILP	–	–	–	4,51 c
ILPF-1,5	–	–	–	7,29 ab
ILPF-3,75	–	–	–	6,77 b
ILPF-7,5	–	–	–	6,98 b
ILPF-11,25	–	–	–	7,87 a
Média	–	–	–	6,68

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si. ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; (–): informação não disponível.
[1] Tukey, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2019a). [2] Teste t, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2020a).

entre as fileiras de árvores, em comparação às bordas devido a diferenças em transmissão de RFA. Esse padrão, frequentemente denominado "efeito parabólico", foi descrito por Newman et al. (1997) e posteriormente confirmado por Reynolds et al. (2007), Mendes et al. (2013), Deiss et al. (2014), Nicodemo et al. (2016a) e Pezzopane et al. (2019a).

Após o desbaste das plantas de eucalipto em 2016, dando-se início à Fase 2 do sistema ILPF (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), houve nova renovação das pastagens com plantio de milho para ensilagem durante a safra de 2016/17. O manejo foi feito de maneira similar ao que ocorreu nas safras de 2013/14 e 2014/15. Na safra de 2016/17, Pezzopane et al. (2020a) avaliaram o crescimento do milho de nos pontos ILPF-1,9 m, ILPF-3,75 m, ILPF-7,50 m e ILPF-11,25 m distantes do renque norte de árvores, comparando com o sistema ILP, de maneira análoga ao estudo de Pezzopane et al. (2019a).

No estudo de Pezzopane et al. (2020a), não foram constatadas diferenças significativas de produtividade de milho entre as posições do ILPF e ILP (Tabela 7.1). Isso indica que as melhorias nos aspectos microclimáticos trazidas pelo desbaste de árvores foram suficientes para manter as produtividades entre os sistemas semelhantes. Neste estudo, a média de transmissão de RFA entre as posições do ILPF foi de 65%. Especificamente no ponto ILPF-1,9 m, ponto mais próximo das linhas de árvores, a transmissão de RFA foi de 55,6%, enquanto no estudo de Pezzopane et al. (2019a) foi de 44,6% no mesmo sistema. O milho do sistema ILPF também teve maior proporção de grãos na biomassa total em ILPF-3,75 m, ILPF-7,50 m e ILPF-11,25 m do que no ILP e maior teor de proteína em todas as posições do ILPF, quando comparado ao ILP (Tabela 7.1). Adicionalmente, os autores avaliaram a umidade do solo e registraram valores semelhantes entre as posições avaliadas e ao longo do perfil do solo (de 0 a 1 m), como resultado do elevado volume de chuvas no período (Pezzopane et al., 2020a).

7.2.1.2 Aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) no experimento SSP-nativas

Após desrama das árvores capixingui (*Croton floribundus*) e mutambo (*Guazuma ulmifolia*) em novembro de 2010 no SSP-nativas (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), foi semeada aveia-preta em abril de 2011 (Nicodemo et al., 2016a). O crescimento da cultura foi avaliado entre as faixas de árvores, distanciadas 17 m entre si, em sete transectos igualmente espaçados: dois transectos (um de cada lado) próximos às faixas de árvores, um no centro do espaçamento e quatro intermediários entre os extremos, e o transecto central. Adicionalmente, a partir da primeira faixa de árvores, foram realizadas avaliações a distâncias de 3, 6, 9, 12, 15, 18 e 21 m. Essa configuração permitiu a avaliação do crescimento da gramínea em diversas condições de transmissão de RFA.

Foi observado por Nicodemo et al. (2016a) que houve redução dos níveis de PAR nas proximidades das árvores, de modo que, a partir de 10 m das árvores, as plantas recebiam mais de 90% do nível máximo de radiação registrado. Verificou-se que a incidência proporcional de PAR apresentou relação linear com o logaritmo natural da produção de biomassa aérea (Figura 7.1). Nesse contexto, a produção de aveia-preta nas áreas mais próximas às árvores foi inferior, principalmente decorrente de menor número de plantas estabelecidas. Os autores registraram a produção média de matéria seca de 214 kg ha^{-1} entre as faixas de árvores e 357 kg ha^{-1} na primeira linha de plantio fora das faixas (a 3 m da primeira faixa), enquanto a produtividade a 15 m de distância da primeira faixa de árvores ultrapassou 4.000 kg ha^{-1}.

7.2.2 Pastagens

7.2.2.1 Capim-piatã (*Urochloa* (syn. *Brachiaria*) *brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã) no experimento ILPF-Corte

O crescimento do capim-piatã foi avaliado durante a condução do ILPF-Corte, conforme práticas de

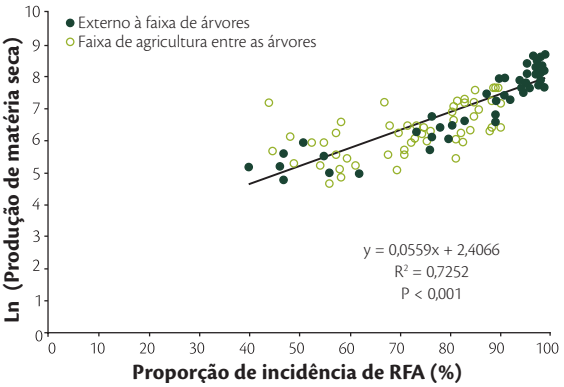


Figura 7.1. Incidência relativa de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em diferentes distâncias e logaritmo natural da produção de matéria seca de aveia, cultivada no sistema silvipastoris (SSP-Nativas). Fonte: Nicodemo et al. (2016a).

manejo eram adotadas. Em estudo inicial conduzido por Pezzopane et al. (2019a), o crescimento do capim-piatã foi avaliado em quatro posições do sistema ILPF (ILPF-1,5 m; ILPF-3,75 m; ILPF-7,5 m e ILPF-11,25 m distante do renque norte) e em sistema ILP após a renovação do pasto com plantio simultâneo de milho em 2013/14 e 2014/15. Por meio de regressão, os autores constataram efeito quadrático, de modo que transmissões de RFA maiores ou iguais a 65% resultaram em taxa de acúmulo de forragem (kg MS ha^{-1} dia^{-1}) similar ou superior ao registrado nos pastos não sombreados (Tabela 7.2 e Figura 7.2).

Considerando que o balanço hídrico estimou pouca restrição hídrica durante o período de crescimento do pasto, a transmissão da RFA através da copa das árvores foi apontada como a principal causadora das diferenças obtidas em produtividade e, nesse sentido, o valor de 65% pode ser considerado como um limiar a ser perseguido para garantir produtividades de sistemas de ILPF similares às obtidas à ILP ou a pleno sol (PS) (Pezzopane et al., 2019a), ao menos para a cultivar estudada ou cultivares semelhantes. Esses resultados são ratificados por outros estudos com a mesma espécie ou outras espécies do gênero *Urochloa* (Paciullo et al., 2007, 2008, 2011a; Bosi et al., 2014). Além disso, nota-se que os resultados do ano de 2014/15 estão mais concentrados em menores valores de transmissão de radiação, demonstrando o aumento da interceptação de radiação pelo dossel das árvores ao longo do tempo decorrente do crescimento do componente arbóreo e evidenciando a necessidade de práticas de manejo como desbaste e desrama das árvores (Nicodemo et al., 2016a). A urgência dessa necessidade é dependente da velocidade de crescimento das árvores e da população inicial adotada, de modo que maiores populações iniciais e crescimento mais acelerado aumentam a urgência.

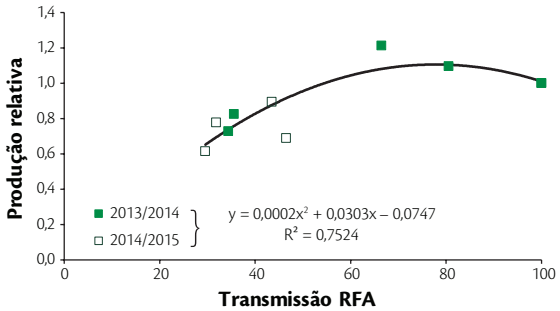


Figura 7.2. Relação entre a transmissão da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e a produtividade relativa [produção de forragem no sistema integrado lavoura-pecuária-floresta (ILPF) / produção de forragem no sistema lavoura-pecuária (ILP)] nas safras de 2013/14 e 2014/15].
Fonte: Pezzopane et al. (2019a).

Vale ressaltar que as menores produtividades em sistemas sombreados, quando há alta interceptação de radiação pelo dossel das árvores, ocorrem quando os sistemas integrados são comparados com sistemas intensivos. No entanto, em outro estudo (Pezzopane et al., 2020b) foi constatado maior acúmulo de forragem no sistema de ILPF (1144,7 e 790, 4 kg MS ha^{-1} ciclo de $pastejo^{-1}$, nos anos de 2013/14 e 2014/15, respectivamente) quando comparado a um sistema extensivo (496, 3 e 472,9 kg MS ha^{-1} ciclo de $pastejo^{-1}$, nos anos de 2013/14 e 2014/15, respectivamente). Isso demonstra a potencialidade de sistemas integrados como estratégia de intensificação sustentável de pastagens.

A similaridade no acúmulo de forragem em sistemas moderadamente sombreados e não sombreados é decorrente de alterações morfofisiológicas, como o aumento da área foliar específica (AFE), definida como área foliar por unidade de massa foliar, também relatado por Pezzopane et al. (2019a). O aumento na AFE é consequência de uma adaptação à baixa irradiância, de modo que, para cada unidade de massa seca de folha, a planta seja capaz de interceptar maior porção de radiação (Peri et al., 2007; Pandey et al., 2011; Bosi et al., 2014; Lopes et al., 2017). Em contrapartida, sob altas irradiâncias, as folhas são mais espessas com um número maior de cloroplastos por unidade de área, permitindo a absorção da radiação interceptada (Evans; Poorter, 2001). Esse uso otimizado da massa de folhas produzida é um dos aspectos que garante similaridade no acúmulo de forragem de plantas moderadamente sombreadas, e é um resultado que ocorre de forma consistente em pastos sombreados.

Pezzopane et al. (2019a) registraram aumentos no teor de proteína bruta nos tecidos vegetais de plantas sombreadas quando comparado às plantas não sombreadas (Tabela 7.3), resultado frequentemente registrado na literatura (Paciullo et al., 2011b; Carvalho et al., 2019; Dias et al., 2020). O incremento na deposição de resíduos vegetais e a maior diversidade na composição da matéria orgânica contribuem para o aumento da ciclagem de nutrientes e para a melhoria da relação C/N do solo, favorecendo a mineralização ao longo do tempo e proporcionando

Tabela 7.2. Produtividade do capim-piatã em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ou pleno sol e em quatro posições (ILPF/SSP-1,5; ILPF/SSP-3,75; ILPF/SSP-7,50; e ILPF/SSP-11,25 m distante do renque norte de árvores), em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou silvipastoril (SSP), no período de 2013 a 2018 e 2020 a 2023.

Tratamento	Variável					
	Taxa de acúmulo de forragem (kg MS ha^{-1} dia^{-1})					
	2013/14[1]	**2014/15[1]**				**Média**
ILP	38,2 a	50,1 a	–	–	–	44,2
ILPF-1,5	27,9 a	44,9 a	–	–	–	36,4
ILPF-3,75	31,6 a	39,1 a	–	–	–	35,4
ILPF-7,5	46,5 a	30,9 a	–	–	–	38,8
ILPF-11,25	42,0 a	34,6 a	–	–	–	38,3
Média	37,2	39,9	–	–	–	38,6
	Massa de forragem pré-pastejo (kg MS ha^{-1})					
	2015/16[3]					
Pleno sol	2454,3	–	–	–	–	–
SSP	8055,7	–	–	–	–	–
Média	5255	–	–	–	–	–
	Acúmulo de forragem (kg MS ha^{-1} ciclo^{-1})					
	2017[2]			**2018[2]**		
	Outono	**Inverno**	**Primavera**	**Verão**		**Média**
ILP	1874,0 a	391,3 a	2564,6 a	2134,4 a	–	1741,1
ILPF-1,5	1722,7 a	557,8 a	1884,1 a	1951,5 a	–	1529,0
ILPF-3,75	1651,2 a	552,0 a	1867,5 a	2057,7 a	–	1532,1
ILPF-7,5	1826 a	107,9 a	2808,7 a	2361,5 a	–	1776,0
ILPF-11,25	1958,5 a	266,3 a	2187,2 a	2156,7 a	–	1642,2
Média	1806,5 a	375,1 a	2262,4 a	2132,4 a	–	1644,1
	2017[4]				**2018[4]**	
	Verão	**Outono**	**Inverno**	**Primavera**	**Verão**	**Média**
Pleno sol	2341,3	1645,1	535,2	1794,4	2415,8	1901,3
SSP-1,5	1961,3^{ns}	392,5^{ns}	105,1^{ns}	851,3^{ns}	1639,9^{ns}	1798,5
SSP-3,75	2073,1^{ns}	769,8^{ns}	476,7^{ns}	1574,7^{ns}	2014,1^{ns}	1838,1
SSP-7,5	2882,7^{ns}	1985,8^{ns}	39,7^{ns}	1687,4^{ns}	1492,8^{ns}	1779,4
SSP-11,25	1953,0^{ns}	536,5^{ns}	471,1^{ns}	995,3^{ns}	1944,1^{ns}	1922,7
Média	2242,3^{ns}	1065,9^{ns}	325,6^{ns}	1380,6^{ns}	1901,3^{ns}	1901,3
	Acúmulo de biomassa viva (kg MS ha^{-1} ciclo^{-1})					
	2020-2023[5]					
Pleno sol	2433,0 a	–	–	–	–	–
SSP	2097,2 a	–	–	–	–	–
média	2265,1	–	–	–	–	–

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si. ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; SSP: sistema silvipastoril; (–): informação não aplicável; * e ^{ns} representam diferença e ausência de diferença significativa, respectivamente, entre a posição do SSP e o pleno sol (Dunnett, p≤ 0.05).

[1] Tukey, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2019a). [2] Teste t, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2020a). [3] Neste período não foi realizado teste estatístico. [4] Fonte: Dados extraídos de Brunetti et al. (2022). [5] Teste de Fischer, p≤ 0,05.

Fonte: Dados extraídos de Brunetti et al. (2025a).

Tabela 7.3. Teor de proteína bruta em capim-piatã em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ou pleno sol (PS) e em quatro posições (ILPF/SSP-1,5; ILPF/SSP-3,75; ILPF/SSP-7,50; e ILPF/SSP-11,25 m distante do renque norte de árvores), em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou silvipastoril (SSP), no período de 2013 a 2018 e 2020 a 2023.

Tratamento	Variável					
	Proteína bruta (%)					
	2013/14[(1)]	**2014/15[(1)]**	**–**	**–**	**–**	**Média**
ILP	9,3	11,5	–	–	–	10,4 c
ILPF-1,5	11	13,6	–	–	–	12,3 bc
ILPF-3,75	12,5	15,5	–	–	–	14 ab
ILPF-7,5	14	16,2	–	–	–	15,1 a
ILPF-11,25	13	16,4	–	–	–	14,7 a
Média	12	14,6	–	–	–	13,3
	2017[(2)]			**2018[(2)]**		
	Outono	**Inverno**	**Primavera**	**Verão**	**–**	**Média**
ILP	10,8b	5,9b	8,1b	9,5a	–	8,6
ILPF-1,5	15,1a	7,9a	12,1a	12,8a	–	12,0
ILPF-3,75	15,5a	8,0a	11,8a	11,9a	–	11,8
ILPF-7,5	15,8a	8,5a	11,8a	11,1a	–	11,8
ILPF-11,25	14,6a	8,7a	12,3a	11,2a	–	11,7
Média	14,4	7,8	11,2	11,3	–	11,2
	2017[(3)]				**2018[(3)]**	
	Verão	**Outono**	**Inverno**	**Primavera**	**Verão**	**Média**
Pleno sol	8,1	9,7	4,1	6,2	7,0	7,0
SSP-1,5	13,0*	13,0^{ns}	5,7^{ns}	13,1*	12,9*	11,5
SSP-3,75	11,3*	11,1^{ns}	5,3^{ns}	11,7*	13,1*	10,5
SSP-7,5	11,3*	13,0^{ns}	6,2*	11,1*	11,8*	10,7
SSP-11,25	10,1^{ns}	12,4^{ns}	6,2*	12,2*	12,2*	10,6
Média	10,8	11,8	5,5	10,9	11,4	
	2020-2023[(4)]					
	Estação seca	**Estação chuvosa**	**–**	**–**	**–**	**Média**
Pleno sol	4,0 b	6,6 b	–	–	–	5,3
SSP	6,0 a	10,2 a	–	–	–	8,1
Média	5,0	8,4	–	–	–	13,4

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si. ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; SSP: sistema silvipastoril; (–): informação não aplicável; * e ^{ns} representam diferença e ausência de diferença significativa, respectivamente, entre a posição do SSP e o pleno sol (Dunnett, p≤ 0.05).

[(1)] Tukey, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2019a). [(2)] Teste t, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2020a). [(3)] Fonte: Dados extraídos de Brunetti et al. (2022). [(4)] Teste de Fischer, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Brunetti et al. (2025a).

uma oferta mais estável de nitrogênio para as plantas (Nair et al., 1999). Adicionalmente, similar ao que ocorre com plantas de milho para ensilagem (item 7.2.1), em ambientes sombreados as temperaturas mais amenas reduzem a eficiência das enzimas envolvidas na fotossíntese C4. Como resposta, as plantas aumentam a concentração dessas enzimas por unidade de massa, o que resulta em maior teor de nitrogênio nos tecidos foliares, dado que grande parte do N está associado às enzimas fotossintéticas (Long, 1983). Adicionalmente,

uma alternativa a ser considerada para esse tipo de resposta, especialmente em locais onde o sombreamento é limitante para o crescimento da forrageira, é o efeito diluição, em que as mesmas quantidades de nitrogênio são absorvidas por plantas sombreadas e não sombreadas; contudo, devido ao maior crescimento das plantas não sombreadas, o nitrogênio se dilui mais no tecido dessas plantas e menos nos tecidos de plantas sombreadas (Gastal et al., 2015).

Outra possibilidade frequentemente considerada é o desenvolvimento mais acelerado de plantas a pleno sol devido à maior temperatura no tecido foliar dessas plantas, uma vez que as forrageiras frequentemente apresentam menor teor de proteína em idades fisiológicas mais avançadas (Ferreira et al., 2018). Savvides et al. (2013) explicam que a temperatura no meristema é influenciada pela quantidade de radiação direta, atingindo o tecido, e pode variar consideravelmente da temperatura do ar, de modo que, ainda que as temperaturas do ar no ILPF e ILP sejam semelhantes, a temperatura meristemática do ILPF pode ser maior do que do ILP. Mais estudos são necessários para determinar quais desses fatores são os mais importantes no aumento do teor de proteína em pastos sombreado para servir de base para guiar produtores e melhoristas de plantas forrageiras a explorar essa vantagem.

Os menores valores de produtividade de 2014/15, embora associados com maiores valores de proteína bruta, levaram à necessidade de desbaste do eucalipto em julho de 2016 de 333 para 166 árvores por ha, visando aumentar a quantidade de radiação disponível para o pasto, dando início à Fase 2 do sistema (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3).

Após desbaste do componente arbóreo, duas das quatro áreas do sistema sombreado e pleno sol foram renovadas com plantio de milho para ensilagem, enquanto em outra parte esta prática não ocorreu. Para tanto, nos pastos renovados, foi semeado o milho para ensilagem em novembro de 2016 com colheita em fevereiro de 2017, e o capim-piatã semeado em seguida no mesmo mês (Pezzopane et al., 2020a).

O desbaste das árvores resultou em transmissão de radiação que variou de 50% nos meses de outono e inverno e 60% nos durante a primavera e o verão (Pezzopane et al., 2020a). O desbaste das árvores resultou em acúmulo de forragem similar entre as posições do ILPF comparado ao ILP (Tabela 7.2) em todas as estações. Nos meses chuvosos (primavera e verão), a transmissão próxima ao limiar de 65% garantiu radiação suficiente para que a forrageira atingisse acúmulos de forragem e índices de área foliar similares ao ILP. Nas estações secas (outono e inverno), as baixas temperaturas e pluviosidade são fatores altamente limitantes à produção forrageira, o que faz com que não haja diferenças significativas de produtividade entre os sistemas mesmo com as transmissões de RFA pelo dossel das árvores, sendo consideravelmente abaixo do limiar de 65% (Pezzopane et al., 2020a).

Nesse contexto, a estratégia de plantio das árvores em sentido leste-oeste em latitudes mais altas na faixa tropical tem como objetivo maximizar a transmissão de radiação e produtividade forrageira nos meses chuvosos, uma vez que, nos meses de seca em que a transmissão de RFA é menor, outros fatores como a temperatura e pluviosidade são altamente limitantes, o que reduz a produtividade para níveis similares entre sistemas sombreados ou não.

Assim como na Fase 1 do sistema, o teor de proteína bruta foi maior no sistema ILPF em comparação com o sistema ILP em todas as estações do ano, com exceção do verão. Por outro lado, o valor de digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS) foi menor no ILPF nos meses outono e inverno, mas similar nas outras estações (Pezzopane et al., 2020a).

Os sistemas não renovados com plantio de milho foram avaliados por Brunetti et al. (2022). A transmissão de RFA ficou maior que o limiar de 65% na maioria das posições entre renques de árvores no verão de 2017, mas foi menor no outono, inverno e primavera de 2017 e verão de 2018. Enquanto durante o outono e inverno a diminuição da transmissão de RFA é consequência da combinação entre orientação das árvores e declinação solar, na primavera de 2017 e verão de 2018 ela diminuiu devido ao crescimento de ramos laterais do eucalipto.

Não houve diferença estatística no acúmulo de forragem durante todo o experimento. No entanto, no verão de 2017, o acúmulo de forragem do SSP foi apenas menor 5% do que no pleno sol, quando se considera a média das posições, enquanto no verão de 2018 essa diferença subiu para 26% (Brunetti et al., 2022; Tabela 7.1). O desbaste das árvores aumenta a quantidade de radiação disponível para as árvores restantes, estimulando o crescimento de ramos laterais, o que, com o tempo, diminui a RFA disponível

para o pasto, diminuindo sua produtividade progressivamente. Esses resultados demonstravam a necessidade de outro desbaste para manter a produtividade do pasto razoável.

Vale ressaltar que o acúmulo de forragem similar, tanto quando se compara o ILP com ILPF quando se compara o SSP com o pleno sol – principalmente nas estações próximas ao desbaste das árvores –, é decorrente das adaptações morfofisiológicas à sombra, recorrente nos estudos de sistemas sombreados, como é corroborado pela maior área foliar específica nos sistemas sombreados, quando comparado aos sistemas sem sombra em ambos os estudos (Pezzopane et al., 2019a; Brunetti et al., 2022).

O estudo de Brunetti et al. (2022) também demonstrou maior teor de proteína bruta no SSP do que no pleno sol durante a estação chuvosa, conforme consistentemente registrado na literatura e durante a condução do sistema ILPF-Corte da Embrapa Pecuária Sudeste. Adicionalmente, diferentemente do que registrado por Pezzopane et al. (2020a), Brunetti et al. (2022) registraram maior DIVMS nos sistemas sombreados durante a primavera de 2017 e o verão de 2018 (Tabela 7.4). Maiores DIVMS também são observadas em algumas ocasiões em sistemas sombreados, mas de maneira menos frequente e consistente do que o teor de proteína bruta (e.g., Santos et al., 2016). Provavelmente, a maior DIVMS é decorrente do menor aquecimento das plantas sombreadas, uma vez que o aquecimento frequentemente aumenta o teor de fibras das forragens, o que reduz sua qualidade e digestibilidade (Nelson; Moser, 1994; Dumont et al., 2015).

Devido às reduções progressivas da produtividade do componente forrageiro, houve novo desbaste do componente arbóreo de 166 para 83 árvores por ha, deu-se início à Fase 3 do sistema (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3). Em razão da baixa densidade de árvores final, o efeito do crescimento de ramos laterais na diminuição de transmissão de RFA foi menor, o que garantiu que a transmissão de RFA ficasse em torno de 75% e 68% nas estações chuvosas dos anos 2020 a 2023 (Brunetti et al., 2025a). Tal efeito garantiu que o acúmulo de biomassa viva fosse similar entre os tratamentos SSP e pleno sol nos três anos avaliados. Nesse contexto, as fases finais de sistemas integrados, por conterem menor população de árvores, são oportunidade importante para maximizar a produção forrageira por um período prolongado. Assim como consistentemente registrado nos períodos anteriores dos sistemas, a área foliar específica e a proteína bruta continuaram sendo maiores no SSP do que PS. Adicionalmente, a DIVMS foi maior no SSP na estação seca do primeiro ano, chuvosa do segundo ano e em ambas as estações do terceiro ano de estudo.

7.2.2.2 Braquiária decumbens [*Urochloa* (syn. *Brachiaria*) *decumbens* Stapf cv. Basilisk] no experimento SSP-nativas

No sistema SSP-nativas, as árvores foram implantadas no sentido norte-sul, com leve inclinação noroeste-sudeste, em função da acentuada declividade do terreno no sentido oposto. Essa orientação visou minimizar os riscos de erosão do solo. Essa configuração não permite que altas irradiâncias sejam atingidas durante a época chuvosa para explorar o potencial produtivo da pastagem nesses períodos, como é feito no ILPF-Corte. Nesse contexto, há maior dificuldade em atingir produtividades semelhantes do que em sistemas a pleno sol.

Após a arborização da área, em 2007 (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), Bosi et al. (2014) avaliaram do efeito da sombra em quatro pontos de distância dos renques de árvores a 2 m do renque leste; a 6 m do renque leste; a 6 m do renque oeste; e a 2 metros do renque oeste nas características produtivas e morfológicas do pasto no período de novembro de 2012 a setembro de 2013. Os autores concluíram que o acúmulo de forragem foi menor em transmissões de radiação menores que 61%, que ocorreu na posição 2 m a oeste (~1.200 kg MS ha^{-1} ciclo de $pastejo^{-1}$), quando comparado às posições 6 m a leste (~1.800 kg MS ha^{-1} ciclo de $pastejo^{-1}$) e 6m a oeste (~1.700 kg MS ha^{-1} ciclo de $pastejo^{-1}$), que tiveram ~75% de transmissão de RFA. De maneira similar ao que ocorreu no ILPF-Corte, nos períodos de transição e de seca, quando há limitação hídrica e térmica para o crescimento do pasto, essas diferenças foram minimizadas com baixos valores de produtividade em todas as posições estudadas, variando de ~200 a ~700 kg MS ha^{-1} ciclo de $pastejo^{-1}$ para os períodos da seca e transição, respectivamente.

O índice de área foliar (IAF) teve comportamento similar ao acúmulo de forragem, com diferença significativa ocorrendo entre as posições 6 m a leste (~3,5 m^2 m^{-2}) e 2 m a leste (~2,5 m^2 m^{-2}) na estação chuvosa, enquanto nas estações de transição e seca os valores de IAF foram baixos e sem diferenças

Tabela 7.4. Digestibilidade in vitro da matéria seca de capim-piatã em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ou pleno sol e em quatro posições (ILPF/SSP-1,5; ILPF/SSP-3,75; ILPF/SSP-7,50; e ILPF/SSP-11,25 m distante do renque norte de árvores), em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou silvipastoril (SSP), no período de 2013 a 2018 e 2020 a 2023.

Tratamento	**Variável**						
	Digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS; %)						
	2013/14[1]	**2014/15[1]**					**Média**
ILP	66,1	72,9	–	–	–	–	69,5 a
ILPF-1,5	60,6	68,0	–	–	–	–	64,3 b
ILPF-3,75	65,0	70,9	–	–	–	–	68 ab
ILPF-7,5	66,7	71,6	–	–	–	–	69,2 a
ILPF-11,25	65,6	72,2	–	–	–	–	68,9 ab
Média	64,8	71,1	–	–	–	–	
	2017[2]			**2018[2]**			
	Outono	**Inverno**	**Primavera**	**Verão**			**Média**
ILP	62,6 a	47,9 a	51,1 a	52,9 a	–	–	53,625
ILPF-1,5	58,1 b	43,7 b	52 a	54,9 a	–	–	52,175
ILPF-3,75	58,8 b	45,2 b	51,4 a	55,1 a	–	–	52,625
ILPF-7,5	60,4 ab	45,6 b	51,3 a	55,4 a	–	–	53,175
ILPF-11,25	59,7 b	45,6 b	51,4 a	55,7 a	–	–	53,1
Média	59,92	45,6	51,44	54,8	–	–	52,94
	2017[3]				**2018[3]**		
	Verão	**Outono**	**Inverno**	**Primavera**	**Verão**		**Média**
Pleno sol	51,9	47,2	35,9	40,5	48,2	–	44,74
SSP-1,5	57,6^{ns}	50,5^{ns}	33^{ns}	52,1*	55,4^{ns}	–	49,72
SSP-3,75	55,8^{ns}	45,3^{ns}	34,2^{ns}	49,4*	55,9^{ns}	–	48,12
SSP-7,5	56,4^{ns}	49^{ns}	34,9^{ns}	47,3*	52,8*	–	48,08
SSP-11,25	54,6^{ns}	49,7^{ns}	35,1^{ns}	51,5*	54,5^{ns}	–	49,08
Média	55,26	48,34	34,62	48,16	53,36	–	47,948
	2020/21[4]		**2021/22[4]**		**2022/23[4]**		
	Estação seca	**Estação chuvosa**	**Estação seca**	**Estação chuvosa**	**Estação seca**	**Estação chuvosa**	**Média**
Pleno sol	42,8 b	52,3 a	42,7 a	53,7 b	45 b	54,8 b	48,6
SSP	48,8 a	54,9 a	40,4 a	64,8 a	51,1 a	67,8 a	54,6
Média	45,8	53,6	41,6	59,3	48,1	61,3	51,6

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si. ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; SSP: sistema silvipastoril; (–): informação não aplicável; * e ^{ns} representam diferença e ausência de diferença significativa, respectivamente, entre a posição do SSP e o pleno sol (Dunnett, p≤ 0.05).

[1] Tukey, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2019a); [2] Teste t, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Pezzopane et al. (2020a); [3] Fonte: Dados extraídos de Brunetti et al. (2022); [4] Teste de Fischer, p≤ 0,05. Fonte: Dados extraídos de Brunetti et al. (2025a).

significativas entre as posições (Bosi et al., 2014). Por outro lado, na posição 6 m a leste as plantas atingiram alturas de 60 cm na estação chuvosa, maior do que a altura alcançada nas outras posições que foi de 50 cm, consequência do estiolamento das plantas que ocorre como resposta adaptativa (Sangoi et al., 2002). Adicionalmente, a área foliar específica (AFE) foi maior na estação chuvosa aos 6 m a leste (~350 g cm^{-2}) do

que nas posições 6 m leste e 2 m oeste (~280 g cm^{-2}), de modo a otimizar a massa de folhas produzidas em interceptar o máximo de radiação sob baixas irradiâncias (Peri et al., 2007).

Em outro estudo, Pasquini Neto et al. (2023; 2024) compararam o SSP-nativas com quatro sistemas produtivos com níveis de adoção tecnológica contrastantes, variando desde sistemas altamente intensificados com capim-tanzânia [*Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum*) Jacq. cv. Tanzânia] até sistemas degradados com braquiária-decumbens a pleno sol durante o período de setembro de 2019 a setembro de 2021. Os autores constataram que o alto nível de sombreamento influenciou negativamente o acúmulo de forragem e o IAF (médias anuais de 2549,7 kg de MS ha^{-1} e 1,16 m^2 m^{-2}, respectivamente) de modo que esses valores foram similares aos pastos degradados e menores que os outros três sistemas. Durante a época seca (outono e inverno), todos os sistemas tiveram menores produtividades, todavia as diferenças entre os sistemas permaneceram. Provavelmente, as árvores do sistema SSP-nativas e o baixo desenvolvimento radicular dos pastos degradados agravaram as limitações hídricas nesse período (Bosi et al., 2014; Pezzopane et al., 2015; Pasquini Neto et al., 2024).

Vale ressaltar, no entanto, que estudos em SSP no ambiente tropical com o manejo estratégico do componente arbóreo foram capazes de produzir entre 12% e 40% a mais de biomassa de forragem, quando comparados com sistemas pleno sol (Chará et al., 2019). Portanto, a plasticidade fenotípica das gramíneas permite o uso em SSP sem que os parâmetros produtivos sejam negativamente influenciados pela interação sombreamento e sazonalidade, desde que o manejo do componente arbóreo seja adequado (Peri et al., 2024).

Em relação aos parâmetros nutritivos da forragem, apesar de maior proporção de colmos devido ao estiolamento em pastos sombreados, é possível observar melhores concentrações de PB e DIVMS, associadas ao efeito diluição do nitrogênio, maior ciclagem da matéria orgânica do solo e alterações nas células vegetais (Bula, 1972; Nelson; Moser, 1994; Chará et al., 2019; Pasquini Neto et al., 2024; Peri et al., 2024; Brunetti et al., 2025b). Pasquini Neto et al. (2024), ao avaliarem os teores de PB, fibra em detergente neutro, lignina e DIVMS no SSP-nativas, observaram durante o verão maiores valores de PB e DIVMS (10,8% e 62,4%, respectivamente) e menores de FDN e lignina (68,7% e 4,7%, respectivamente) quando comparados ao sistema degradado, com teores de PB (6,0%), FDN (75,5%), lignina (5,3%) e DIVMS (52,8%). No entanto, ao iniciar o período de transição, estendendo-se até o final do inverno, todos os teores em ambos os sistemas foram afetados negativamente devido à deficiência hídrica.

Vale ressaltar que a grande variabilidade observada no crescimento individual das espécies nativas pode dificultar a definição do momento ideal de entrada dos animais, sem que as árvores sofram danos significativos (Nicodemo et al., 2016b). Portanto, isso destaca a necessidade de um manejo e planejamento adequados do arranjo espacial das árvores para manter a perenidade do sistema e evitar a degradação acelerada da pastagem devido ao sombreamento excessivo, garantindo uma produção e valor nutritivo de biomassa suficiente (Nicodemo et al., 2016b; Brunetti et al., 2025b), pois, com as devidas condições microclimáticas, a produtividade do pasto pode ser preservada e a qualidade da forragem melhorada (Chará et al., 2019; Pasquini Neto et al., 2023, 2024; Peri et al., 2024).

7.2.3 Componente arbóreo

No experimento ILPF-Corte, nos sistemas ILPF e SSP (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), o crescimento das árvores de eucalipto foi realizado semestralmente a partir de 2012 por meio de determinação do diâmetro do caule na altura do peito (DAP 1,3 m acima do solo) e altura das árvores em 15 árvores por piquete. O DAP foi mensurado utilizando fita diamétrica, e as medições de altura foram coletadas utilizando hipsômetro Haglof. Os dados obtidos foram inseridos em equações alométricas logarítmicas ajustadas conforme descritas por Schumacher e Hall (1933) e parametrizadas para os sistemas de produção por Pezzopane et al. (2021).

Na Figura 7.3 são apresentados o volume e biomassa de eucalipto nos sistemas ILPF e SSP no experimento ILPF-Corte ao longo do período entre 2012 e 2024. Até os oito anos de implantação (segundo desbaste), o volume dos troncos foi 225,7 m^3 ha^{-1} no sistema ILPF, estatisticamente superior aos 215 m^3 ha^{-1} do sistema SSP. Já para a biomassa total das árvores, não foram encontradas diferenças entre os sistemas, com 148,3 e 141,0 Mg ha^{-1} nos sistemas ILPF e SSP, respectivamente (Pezzopane et al., 2021).

No corte final da madeira ocorrido em 2024, não foram encontradas diferenças entre os sistemas, com

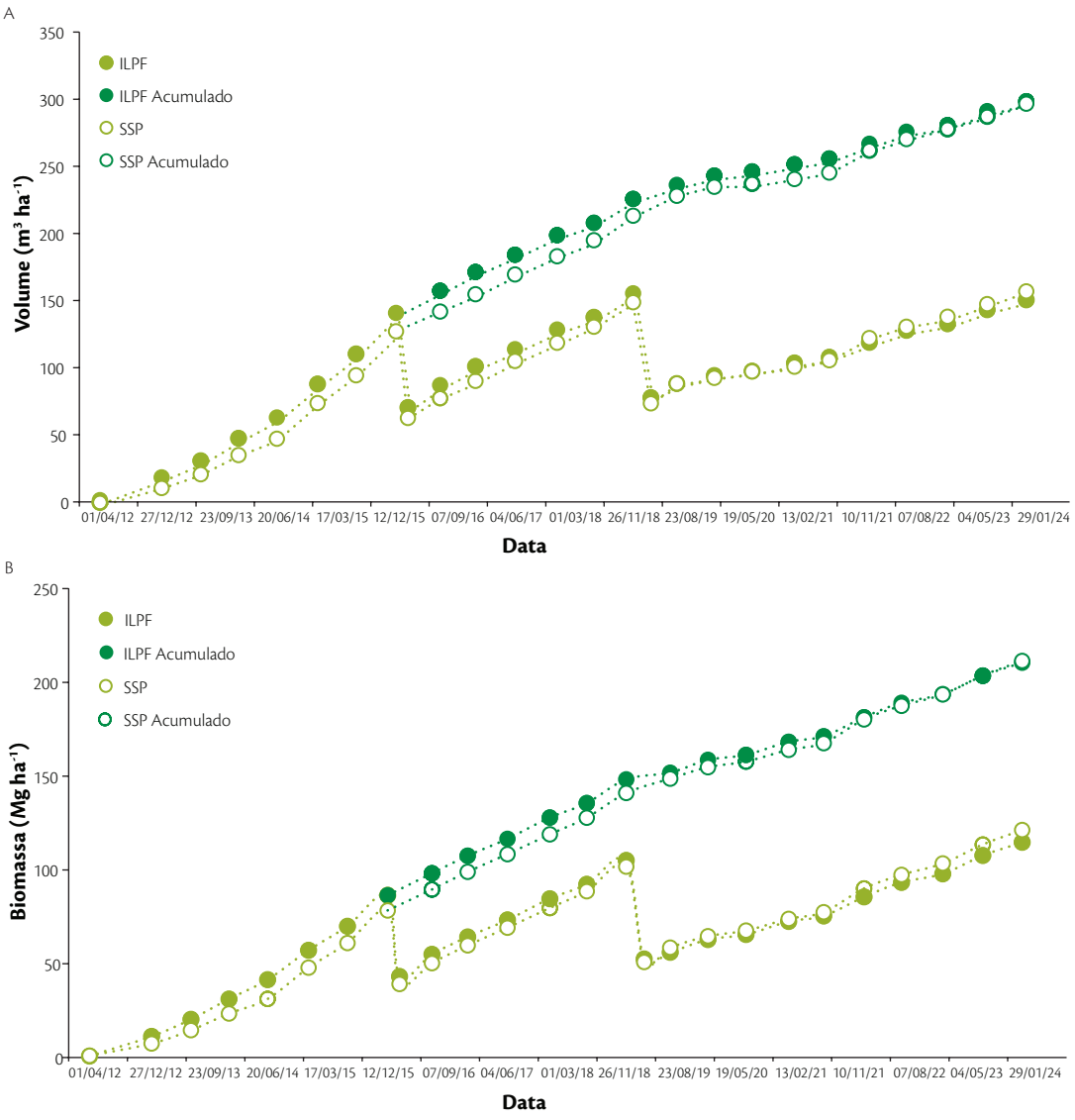


Figura 7.3. Volume do fuste (A) e biomassa total (B) de *Eucalyptus urograndis* (Clone GG100) entre julho de 2012 e abril de 2024, em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e silvipastoril (SSP) em São Carlos-SP, Brasil. Os valores acumulados (linhas verde-escuras) foram calculados somando-se o volume e a biomassa das árvores removidas nos desbastes com o acúmulo das árvores remanescentes.
Fonte: Pezzopane et al. (2021).

média de 298,6 m^3 ha^{-1} de volume de madeira no tronco das árvores dos sistemas, com produção anual de 23,0 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Já para a biomassa total produzida, o valor médio entre os sistemas foi de 211 Mg ha^{-1}.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas integrados de produção, quando bem manejados, podem apresentar produtividade de cultivos agrícolas e de forragem similares e com qualidade de biomassa produzida superior, quando comparados a sistemas a pleno sol. No entanto, a implementação e condução de sistemas integrados de forma bem-sucedida são desafiadoras. Para a escolha adequada das espécies, densidade e arranjo das árvores, deve-se levar em conta o objetivo do sistema produtivo, a minimização da erosão do solo e da competição por radiação e água com os cultivos agrícolas e forra-

geiras. Estratégias de manejo, como desbaste e poda das árvores, são essenciais para manter a competição interespecífica por recursos em níveis moderados por períodos longos. As culturas sombreadas, por sua vez, também devem ser escolhidas e manejadas visando à diminuição do efeito da competição interespecífica na produtividade e maximização do efeito benéfico do sombreamento na qualidade da biomassa produzida.

7.4 REFERÊNCIAS

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C.; SANTOS, P. M.; NICODEMO, M. L. F. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 6, p. 449-456, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000600006.

BRUNETTI, H. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; PASQUINI NETO, R.; BERNARDI, A. D. C.; OLIVEIRA, P. P. A. Productive and nutritive traits of Piatã palisadegrass after thinning the forest component of a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 160, n. 5, p. 338-348, 2022. DOI: http://doi.org/10.1017/S002185962200051X.

BRUNETTI, H. B.; PASQUINI NETO, R.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; ROSSETTO, A.; GARCIA, L. F. P.; SOUSA, A. J. C.; RAMOS, G. G.; BERNARDI, A. C. C.; PEDROSO, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Late stages of tropical silvopastoral system: an opportunity to maximize forage and animal production. **Grass and Forage Science**, v. 80, n. 3, e70010, 2025a. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.70010.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P.; PEZZOPANE, J. R.; BERNARDI, A. C. D. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; ANDRÉ DE, F. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

BULA, R. J. Morphological characteristics of alfalfa plants grown at several temperatures 1. **Crop Science**, v. 12, n. 5, p. 683-686, 1972. DOI: http://doi.org/10.2135/cropsci1972.0011183X001200050039x.

CHARÁ, J.; REYES, E.; PERI, P.; OTTE, J.; ARCE, E.; SCHNEIDER, F. **Silvopastoral systems and their contribution to improved resource use and sustainable development goals**: evidence from Latin America. Cali: FAO; CIPAV; Agri Benchmark, 2019. 60 p.

DEISS, L.; MORAES, A. D.; PELISSARI, A.; SKORA NETO, F.; SILVA, V. P. D.; ANDREOLLA, V. R. M. Oat growth under different nitrogen doses in eucalyptus alley cropping system in subtropical Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1014-1023, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500017.

CARVALHO, P.; DOMICIANO, L. F.; MOMBACH, M. A.; DO NASCIMENTO, H. L. B.; CABRAL, L. S.; SOLLENBERGER, L. E.; PEREIRA, D. H.; PEDREIRA, B. C. Forage and animal production on palisadegrass pastures growing in monoculture or as a component of integrated crop–livestock–forestry systems. **Grass and Forage Science**, v. 74, n. 4, p. 650-660, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.12448.

DIAS, M. B. C.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; BILEGO, U. O.; FURTINI NETO, A. E.; ALMEIDA, D. P.; BRAND, S. P.; VILELA, L. Brachiaria and Panicum max imumin an integrated crop-livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. **Journal of Agricultural Science**, v. 158, p. 349-349, 2020. DOI: http://doi.org/10.1017/S0021859620000659.

DUMONT, B.; ANDUEZA, D.; NIDERKORN, V.; LUSCHER, A.; PORQUEDDU, C.; PICON-COCHARD, C. A meta-analysis of climate change effects on for age quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas Grass. **Grass and Forage Science**, v. 70, n. 2, p. 239-254, 2015. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.12169.

EVANS, J.; POORTER, H. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen parti tioning in maximizing carbon gain. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 8, p. 755-767, 2001. DOI: http://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00724.x.

FERREIRA, E. A.; ABREU, J. G. D.; MARTINEZ, J. C.; BRAZ, T. G. D. S.; FERREIRA, D. P. Cutting ages of elephant grass for chopped hay production. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 3, p. 245-253, 2018. DOI: http://doi.org/10.1590/1983-40632018v4851569.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G.; DURAND, J. L.; LOUARN, G. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In SADRAS, V. O.; CALDERINI, D. F. (ed.). **Crop Physiology**: applications for genetic improvement and agronomy. Cambridge: Academic Press, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00008-X.

KIM, K. H.; LEE, B. M. Effects of climate change and drought tolerance on maize growth. **Plants**, v. 12, n. 20, p. 3548, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/plants12203548.

LOPES, C. M.; PACIULLO, D. S. C.; ARAUJO, S. A. C.; MORENZ, M. J. F.; GOMIDE, C. A. M.; MAURICIO, R. M.; BRAZ, T. G. S. Plant morphology and herbage accumulation of signal grass with or without fertilization, under different light regimes. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 1-5, 2017. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160472.

LONG, S. P. C4 photosynthesis at low temperatures. **Plant, Cell & Environment**, v. 6, n. 4, p. 345-363, 1983. DOI: http://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11612141.

MENDES, M. M. S.; LACERDA, C. F.; CAVALCANTE, A. C. R.; FERNANDES, F. E. P.; OLIVEIRA, T. S. Desenvolvimento do milho sob influência de a'rvores de pau-branco em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 10, p. 1342-1350, 2013. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000005.

NAIR, P. K. R.; BURESH, R. J.; MUGENDI, D. N.; LATT, C. R. Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: myths and science. In BUCK, L. E.; LASSOIE, J. P.; FERNANDES, E. C. M. (ed.). **Agroforestry in sustainable agricultural systems**. Boca Raton: Lewis Publisher Inc., 1999. p. 1–31.

NELSON, C. J.; MOSER, L. E. Plant factors affecting forage quality. In: FAHEY, G. C. (ed.). **Forage quality, evaluation, and utilization**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1994. p. 115–154.

NEWMAN, S. M.; BENNETT, K.; WU, Y. Performance of maize, beans and ginger as intercrops in Paulownia plantations in China. **Agroforestry Systems**, v. 39, n. 1, p. 23-30, 1997. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1005938310106.

NIELSEN, R. L. Drought and heat stress effects on corn pollination. **Journal of Agronomy**, v. 196, p. 19-25, 2002.

NICODEMO, M. L. F.; CASTIGLIONI, P. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; THOLON, P.; CARPANEZZI, A. A. Reducing competition in agroforestry by pruning native trees. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 509-518, 2016a. DOI: http://doi.org/10.1590/0100-67622016000300014.

NICODEMO, M. L. F.; MULLER, M. D.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; CARPANEZZI, A. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BARIONI JÚNIOR, W. Growth of native trees in two agroforestry systems. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 639-648, 2016b. DOI: http://doi.org/10.1590/0100-67622016000400007.

PACIULLO, D. S. C.; CARVALHO, C. A. B.; AROEIRA, L. J. M.; MORENZ, M. J. F.; LOPES, F. C. F.; ROSSIELLO, R. O. P. Morfofisiologia e valor nutritivo do capim-braquiária sob sombreamento natural e a sol pleno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 4, p. 573-579, 2007. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400016.

PACIULLO, D. S. C.; CAMPOS, N. R.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; TAVELA, R. C.; ROSSIELLO, R. O. P. Crescimento de capim-braquiária influenciado pelo grau de sombreamento e pela estação do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 7, p. 917-923, 2008. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000700017.

PACIULLO, D. S. C.; FERNANDES, P. B.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; SOBRINHO, F. S.; CARVALHO, C. A. B. The growth dynamics in Brachiaria species according to nitrogen dose and shade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 2, p. 270-276, 2011a. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982011000200006.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T. D.; FERNANDES, P. B.; MULLER, M. D.; PIRES, M. D. E. F. A.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características pro dutivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1176-1183, 2011b. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000009.

PANDEY, C. B.; VERMA, S. K.; DAGAR, J. C.; SRIVASTAVA, R. C. Forage production and nitrogen nutrition in three grasses under coconut tree shades in the humid-tropics. **Agroforestry Systems**, v. 83, n. 1, p. 1-12, 2011. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-011-9407-2.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; VOLTARELI, G. S.; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNETTI, H. B.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Forage accumulation in silvopastoral and intensified pasture-based systems. In: SYMPOSIUM STRATEGIC PRACTICES FOR MITIGATING GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN GRASSLAND SYSTEMS, 1., 2023, São Carlos, SP. **Anais** [–]. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste; Universidade de São Paulo, 2023. p. 19–21. (Embrapa Pecuária Sudeste. Eventos Técnicos & Científicos, 2).

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; DA SILVA, G. V.; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNETTI, H. B.; BOSI, C.; PEDROSO, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Forage accumulation and nutritive value in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Crop & Pasture Science**, v. 75, n. 5, p. CP24043, 2024. DOI: http://doi.org/10.1071/CP24043.

PERI, P. L.; CHARÁ, J.; VIÑOLES, C.; BUSSONI, A.; CUBBAGE, F.. Current trends in silvopastoral systems. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 1945-1953, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01093-5.

PERI, P. L.; LUCAS, R. J.; MOOT, D. J. Dry matter production, morphology and nutritive value of Dactylis glomerata growing under different light regimes. **Agroforestry Systems**, v. 70, n. 1, p. 63-79, 2007. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-007-9029-x.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, P. M.; DA CRUZ, P. G.; PARMEJIANI, R. S. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 110-119, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-4499.0334.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; DE FARIA PEDROSO, A.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 39-49, 2019a. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; DA ROCHA, E. L. F.; BERNARDI, A. C. C C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Reducing competition in a crop–livestock–forest integrated system by thinning eucalyptus trees. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 4, p. 574–586, 2020a.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. D. C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. D. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agrícola**, v. 77, n. e20180150, p. e20180150, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

REYNOLDS, P. E.; SIMPSON, J. A.; THEVATHASAN, N. V.; ANDREW, M. G. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. **Ecological Engineering**, v. 29, n. 4, p. 362–371, 2007.

SANGOI, L.; GRACIETTI, M. A.; RAMPAZZO, C.; BIANCHET, P. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, v. 79, n. 1, p. 39-51, 2002. DOI: http://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00124-7.

SANTOS, D. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; VILELA, L.; PULROLNIK, K.; BUFON, V. B.; FRANÇA, A. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian savannah. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 16-24, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.026.

SAVVIDES, A.; VAN IEPEREN, W.; DIELEMAN, J. A.; MARCELIS, L. F. Meristem temperature substantially deviates from air temperature even in moderate environments: is the magnitude of this deviation species-specific? **PLANT, Cell & Environment**, v. 36, n. 11, p. 1950-1960, 2013. DOI: http://doi.org/10.1111/pce.12101.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. Journal of Agricultural Research, v. 47, p. 719–734, 1933.

Capítulo 8

Produção Animal e Mitigação de Metano Entérico

Patrícia Perondi Anchão Oliveira, Rolando Pasquini Neto, Henrique Bauab Brunetti, André de Faria Pedroso, Alexandre Rossetto Garcia, Alexandre Berndt, José Ricardo Macedo Pezzopane, Paulo Henrique Mazza Rodrigues



RESUMO: A pecuária brasileira enfrenta o desafio de atender à crescente demanda por alimentos e, ao mesmo tempo, mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Neste contexto, os sistemas integrados de Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) surgem como alternativas sustentáveis, combinando componentes agrícolas, pecuários e florestais para aumentar a produtividade, diversificar a produção e potencializar o sequestro de carbono (C), mitigando, especialmente, o gás metano (CH_4) entérico dos animais. A Embrapa Pecuária Sudeste, neste sentido, tem conduzido experimentos que abordam as diferentes configurações de ILPF (ILP, IPF e ILPF) em comparação com sistemas a pleno sol (PS), avaliando o desempenho animal, as características de carcaça e o respectivo potencial de mitigação desses sistemas. Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos a partir dessas pesquisas. De uma forma geral, o desempenho animal (incluindo o GMD individual e por área) dos sistemas ILPF é frequentemente semelhante ao dos sistemas a PS; enquanto, ambientalmente, os sistemas IPF e ILPF contribuem significativamente para a mitigação do CH_4 entérico. No entanto, a implementação bem-sucedida dos sistemas ILPF não é isenta de desafios. O manejo das árvores é fundamental, pois o sombreamento excessivo pode comprometer a produção da pastagem e, consequentemente, o desempenho animal. A escolha adequada das espécies arbóreas e forrageiras, bem como a densidade e o arranjo das árvores, são determinantes para otimizar os resultados.
Palavras-chave: Desempenho Animal; Gases de Efeito Estufa (Gee); CH_4; Mitigação de Metano Entérico; Sequestro de Carbono; Eucalipto.

ABSTRACT: Brazilian livestock farming faces the challenge of meeting the growing demand for food while simultaneously mitigating greenhouse gas (GHG) emissions. In this context, integrated crop-livestock-forestry (ICLF)

https://doi.org/10.4322/9786586819427-8

systems emerge as sustainable alternatives, combining agricultural, livestock, and forestry components to increase productivity, diversify production, and enhance carbon sequestration, especially mitigating enteric methane (CH_4) from animals. Embrapa Pecuária Sudeste, in this regard, has been conducting experiments comparing different ICLF configurations (ILP, IPF, and ILPF) with full-sun (FS) systems, evaluating animal performance, carcass characteristics, and the mitigation potential of these systems. This chapter presents the main results obtained from these studies. In general, animal performance (including individual and per-area ADG) in ICLF systems is often similar to that in FS systems. Environmentally, IPF and ILPF systems contribute significantly to mitigating enteric CH_4, but implementing ILPF systems is not without challenges. Tree management is crucial, as excessive shading can compromise pasture production and, consequently, animal performance. The appropriate choice of tree and forage species, along with tree density and arrangement, is essential to optimizing results.
Keywords: Animal Performance; Greenhouse Gases (Ghg); CH_4; Enteric Methane Mitigation; Carbon Sequestration; Eucalyptus.

8.1 INTRODUÇÃO

A pecuária global enfrenta um grande desafio para atender à crescente demanda mundial por alimentos, ao mesmo tempo em que lida com a preocupação com os impactos ambientais inerentes, especialmente no que se refere às emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Oliveira, 2015; Monteiro et al., 2024, 2025). O setor agropecuário é responsável por 33,6% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil, e dessas emissões, 19% são de CH_4. Das emissões de CH_4, 97% são provenientes dos bovinos e, desse montante, 86% são do rebanho de corte e 11% do rebanho leiteiro (Brasil, 2022). Nesse contexto, tradicionalmente, os sistemas de produção baseados em pastagens extensivas são frequentemente associadas às maiores intensidades de emissão de CH_4 e área de uso de terra em função da baixa eficiência produtiva (Chará et al., 2019; Oliveira et al., 2020; Aranha et al., 2022; Agethen et al., 2024).

Nesse cenário, os sistemas integrados de produção de Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) emergem como uma estratégia promissora para conciliar a intensificação da produção de alimentos com sustentabilidade (Meo-Filho et al., 2022; Aranha et al., 2022; Agethen et al., 2024; Peri et al., 2024; Oliveira et al., 2024). Esses sistemas de integração são multifuncionais, combinam intencionalmente diversos componentes agrícolas, pecuários e florestais para promover sinergias na mesma área, aumentando a produtividade e a eficiência da alimentação dos ruminantes, a diversificação de produtos, além de potencializar a mitigação das emissões de CH_4 por meio do sequestro de carbono (C) e ciclagem de nutrientes do sistema (Chará et al., 2019; Aranha et al., 2022; Agethen et al., 2024; Oliveira et al., 2024; Monteiro et al., 2025).

Adicionalmente, a implementação desses sistemas no Brasil é incentivada por políticas públicas como o Plano ABC+ (Agricultura de Baixo Carbono), que visa ao desenvolvimento multifuncional de uso da terra, permitindo a recuperação de pastagens degradadas e a mitigação das emissões de GEE (Agethen et al., 2024; Monteiro et al., 2024; Santos et al., 2025). Além disso, os benefícios desses sistemas no contexto da produção animal são vastos, podendo incluir:

- Melhoria do microclima para os animais, proporcionando conforto térmico e bem-estar;
- Aumento da eficiência reprodutiva dos animais, devido ao menor estresse térmico nos sistemas arborizados;
- Aumento da produtividade e qualidade da forragem (especialmente do teor de proteína) em relação aos sistemas extensivos forragem, resultando em melhor desempenho animal;
- Sequestro de carbono no solo e na biomassa das árvores, ajudando a compensar as emissões de GEE da pecuária e contribuindo para a proteção climática;
- Conservação da biodiversidade e prestação de outros serviços ecossistêmicos, como controle de pragas e regulação hídrica.

Portanto, a adoção de sistemas ILPF representa um caminho para uma pecuária mais eficiente e resiliente diante das mudanças climáticas, conciliando com o uso dos recursos naturais e contribuindo para a otimização da capacidade produtiva, tudo isso em consonância com diversos "objetivos do desenvolvimento sustentável" (Nicodemo et al., 2018; Santos et al., 2018; Carvalho et al., 2019; Chará et al., 2019; Lemes et al., 2021; Aranha et al., 2022; Brunetti et al., 2022; Guimarães

Júnior et al., 2022; Meo-Filho et al., 2022; Sousa et al., 2023; Agethen et al., 2024; Cândido et al., 2024; Peri et al., 2024; Oliveira et al., 2024; Brunetti et al., 2025a, 2025b; Santos et al., 2025).

8.2 DESEMPENHO ANIMAL EM SISTEMAS INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA

8.2.1 Descrição experimental para avaliações de desempenho animal

A Embrapa Pecuária Sudeste possui um papel importante no desenvolvimento de experimentos de sistemas integrados e intensificados de produção animal, promovendo pesquisa, desenvolvimento, inovação e atividades de transferência de tecnologias desenvolvidas, principalmente com foco na sustentabilidade da agropecuária (Nicodemo et al., 2018; Pezzopane et al., 2019; Meo-Filho et al., 2022; Brunetti et al., 2022, 2025a, 2025b). Os diferentes experimentos comparam sistemas de produção extensivos, sem adoção de quaisquer tecnologias, e intensivos baseados na fertilização de pastagens e manejo adequado da planta forrageira, com uso de lotação rotativa e respeitando-se os períodos de descanso e altura de resíduo das pastagens, e diferentes modalidades da integração lavoura-pecuária-floresta. Mais detalhes sobre a descrição dos sistemas dos diversos experimentos podem ser obtidos no Capítulo 3.

Baseados em protocolo experimental estabelecido no Projeto PECUS (Pecuária Sustentável), os sistemas avaliados possuem repetição de área de aproximadamente 3 hectares cada, para permitir o estabelecimento de lotes de animais que possibilitem a avaliação de desempenho animal em suas diversas variáveis (Berndt et al., 2014; Pezzopane et al., 2020). As pesquisas são desenvolvidas com bovinos de corte das raças *Nelore* (*Bos indicus*) e *Canchim* [5/8 *Charolês* (*Bos taurus*) + 3/8 *Nelore*] em diferentes fases de engorda, utilizados como animais traçadores e de lotação (Figura 8.1), sendo mantidos exclusivamente a pasto e com acesso *ad libitum* a água e suplementação mineral (em bebedouros e cochos de alimen-



Fotos: Alexandre Berndt e José Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 8.1. Animais utilizados durante as fases do sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) (A-D).

tação cobertos localizados nas instalações de manejo de cada sistema).

Todos os animais são manejados de acordo com os princípios de experimentação animal e Comitês de Ética em Animais da unidade e das instituições de pesquisa parceiras. Nos sistemas avaliados, os ciclos de pastejo desses animais são de ± 35 dias, incluindo períodos de pastejo de ± 7 dias e de descanso de ± 28 dias, com ajuste da taxa de lotação baseado na técnica de "put-and-take" (Mott; Lucas, 1952), visando manter uma pressão de pastejo mais próxima possível da capacidade de suporte para cada sistema. A avaliação visual da altura do dossel (± 40 cm) e a oferta de forragem pré-pastejo são consideradas para manejar o crescimento das pastagens tropicais e sustentar a produção animal nas diferentes categorias de experimentação (Costa; Queiroz, 2017; Meo-Filho et al., 2022; Brunetti et al., 2025a, 2025b). Além disso, para preservar a produtividade e a longevidade das pastagens, a altura de forragem pós-pastejo sempre foi observada, 20 cm para o capim-piatã (Costa; Queiroz, 2017) e condicionada em ± 50% da altura pré-pastejo (Dim et al., 2015).

8.2.2 Indicadores de desempenho e produção animal

A avaliação experimental de sistemas de produção pecuários, dentre eles as diversas modalidade de integração, é fundamental para compreender as interações e sinergias entre os componentes solo, planta, animal e atmosfera nos diferentes sistemas pecuários desenvolvidos em ambiente tropical. Essas avaliações permitem inferir, principalmente, sobre o efeito arbóreo no contexto da produção animal, contemplando os indicadores de:

- Desempenho animal: incluindo o ganho de peso médio (GMD) diário dos animais, a taxa de lotação (TL) dos sistemas e a produção de ganho de peso por hectare;
- Emissões de CH_4 entérico dos animais: estimadas pela técnica do gás traçador de hexafluoreto de enxofre (SF_6);
- Características de carcaça e carne: considerando o peso de carcaça quente, o rendimento e parâmetros de qualidade de carcaça dos animais (incluindo, o peso e comprimento dos cortes dianteiro e traseiro, área de olho de lombo, espessura de gordura subcutânea e força de cisalhamento).

A análise conjunta desses indicadores permite comparar a eficiência produtiva de cada sistema e realizar estimativas de intensidade de emissão por unidade de produto (considerando as emissões de CH_4 por kg de ganho de peso vivo ou peso de carcaça). Esses dados servem para subsidiar a tomada de decisão dos produtores rurais, orientar programas de transferência de tecnologia e desenhar políticas públicas e setoriais (por exemplo, o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas Agropecuários e Florestais Sustentáveis – PNCPD), além de guiar políticas públicas, como certificações ambientais e estratégias de mercado baseadas em pegada de carbono.

8.2.2.1 Desempenho animal

O desempenho animal é avaliado a partir dos animais traçadores após um período de jejum de 16 horas (de alimentos sólidos) no início e final de cada período experimental. Pesagens intermediárias também são realizadas, aproximadamente, a cada 28 dias sem jejum. A partir das pesagens, é obtido o ganho de peso médio diário (GMD, kg animal^{-1} dia^{-1}), dividindo-se a diferença entre os pesos final e inicial em jejum pelo número de dias em cada período.

A partir das pesagens e da área ocupada pelos lotes, são obtidas as variáveis taxas de lotação (TA): em unidades animais (UA ha^{-1}, em que 1 UA equivale a 1 bovino com 450 kg de peso vivo) e em animais equivalentes (AE ha^{-1}, em que 1 AE equivale à média do peso vivo dos animais traçadores), dividindo-se o peso vivo total (kg) dos animais pelo peso vivo da UA ou AE pela quantidade de hectares de cada sistema de produção. O ganho de peso vivo por hectare (GPVha, kg animal^{-1} ha^{-1}) é calculado multiplicando-se o GMD pelo número de animais equivalentes em cada área.

Os estudos conduzidos nos sistemas de integração, incluindo suas diferentes configurações, integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), têm fornecido dados importantes sobre os benefícios destes quando comparados com monocultivos a pleno sol (PS).

Com relação aos sistemas integrados com árvores, muitos estudos indicam que o GMD entre os sistemas IPF e ILPF podem ser similares aos sistemas a PS (Tabela 8.1) (Santos et al., 2018; Carvalho et al., 2019; Paciullo et al., 2021; Meo-Filho et al., 2022; Brunetti et al., 2025b; Pasquini Neto et al., 2025). Nesse contexto, a presença das árvores é responsável por proporcionar sombreamento, reduzindo o estresse térmico e melhorando o

Tabela 8.1. Característica de desempenho animal (GMD), lotação e (ganho) de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) comparados com sistemas pleno sol (PS).

Fonte	Sistemas	GMD (kg/dia)	TL (UA/ha)	Produtividade (kg/ha/ano)
Santos et al. (2018)	PS	0.492	2.5	640
	IPF - 417 árvores/ha	0.448	1.4	379
	IPF - 715 árvores/ha	0.474	1.3	243
Carvalho et al. (2019)	PS	0.638	1.2	463
	ILP	0.730	1.2	475
	IPF	0.695	1.4	465
	ILPF	0.695	1.5	598
Paciullo et al. (2021)	PS	0.525	±1.5	±120
	IPF	0.583	±1.4	±100
Meo-Filho et al. (2022)	PS - EXT	0.460	1.3	290
	PS - INT	0.590	2.3	615
	ILP	0.580	1.7	487
	IPF	0.440	2.1	497
	ILPF	0.430	1.8	385
Monteiro et al. (2024)	PS	0.630	2.5	-
	ILP	0.710	2.8	-
	IPF	0.670	2.4	-
	ILPF	0.700	3.2	-
Brunetti et al. (2025a)	PS - INT	0.741	3.4	821
	IPF	0.697	3.0	703
Brunetti et al. (2025b)	PS - INT	0.485	2.4	265
	IPF	0.482	2.2	230
Santos et al. (2025)	PS - EXT	0.690	0.94	155
	IPF	0.630	3.92	668
Pasquini Neto et al. (2025)	PS - DEG	0.303	1.89	240
	IPF	0.344	1.24	228

DEG: degradado; EXT: extensivo; GMD: ganho de peso médio diário; ILP: integração lavoura-pecuária; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; INT: intensivo; LT: lotação animal; PS: pleno sol.

desempenho individual dos animais. No entanto, em função dessa característica, o estande populacional de árvores pode proporcionar um sombreamento excessivo, reduzindo a transmissão da radiação fotossinteticamente ativa pelas árvores, limitando o potencial de produção de biomassa de forragem e, consequentemente, o potencial de ganho de peso e de lotação animal no sistema. Além disso, o aumento progressivo do componente florestal sem a intervenção de um manejo estratégico (acima de 99 árvores por hectare ou distância entre renques menor de 28 m) pode neutralizar os benefícios do sistema, reduzindo seu desempenho ao longo do tempo. Esta inviabilização dos benefícios pode ser comparada a sistemas convencionais a PS (Oliveira et al., 2022b).

Nos sistemas IPF e ILPF, o estande mais alto das árvores é justificado tecnicamente quando a prioridade é a produção de produtos florestais (Nicodemo et al., 2016, 2018). Portanto, a definição dos estandes e o planejamento do manejo das árvores devem ser previamente priorizados em função dos produtos a serem obtidos (como lavoura e animais), além das questões econômicas e as demandas regionais por esses produtos. Além disso, com a execução adequada do

manejo arbóreo, incluindo atividades de desrama e desbaste, é possível propiciar condições para o desenvolvimento das lavouras e pastagens, mantendo suas perenidades ao longo dos ciclos de produção (Pezzopane et al., 2024).

Em contrapartida, estudos com sistemas ILP geralmente demonstram vantagens significativas de GMD e lotação animal em comparação aos sistemas convencionais a PS, extensivos com baixo nível tecnológico (EXT) (Meo-Filho et al., 2022). Nesse contexto, o incremento da fertilização periódica da pastagem, além da renovação das culturas anuais (com grãos de milho ou soja), foram capazes de promover maior enriquecimento da fertilidade do solo e disponibilidade de biomassa de forragem de qualidade ao longo do ciclo produtivo. No entanto, quando comparados com sistemas a PS com maior nível tecnológico (INT), essa vantagem não é observada, os resultados tendem a ser semelhantes ou inferiores (Tabela 8.1) (Meo-Filho et al., 2022, Monteiro et al., 2024). Durante a Fase 1 do sistema ILPF-Corte (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), Meo-Filho et al. (2022) relataram que os animais nos sistemas INT e ILP alcançaram, respectivamente, GMD de 0,59 e 0,58 kg dia^{-1}, atingindo taxas de lotação de 2,3 e 2,1 UA ha^{-1}; contrastando com os sistemas EXT, ILPF e IPF, que apresentaram, respectivamente, 0,46, 0,43 e 0,44 kg dia^{-1} de GMD e 1,3, 1,8 e 1,7 UA ha^{-1}.

Adicionalmente, a diversificação dos produtos (incluindo as culturas com milho ou soja) nos sistemas de produção permite melhorar as questões nutricionais dos animais, por meio da suplementação destes insumos para a otimização do GMD e lotação animal (Carvalho et al., 2019; Santos et al., 2025), especialmente em períodos contrastados pela escassez de forragem na época seca do ano (Brunetti et al., 2025a).

Durante a Fase 2 do sistema ILPF-Corte, especificamente no período de maio de 2017 a outubro de 2018 (para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), Oliveira et al. (2022), em seu estudo, relataram que os animais receberam uma suplementação volumosa contendo silagem de milho para sustentar o desempenho e a lotação animal em função do déficit hídrico e da menor disponibilidade de forragem observada durante o período das secas. Para isso, cochos de alimentação adicionais (com 0,70 m linear) foram disponibilizados nos centros de manejo para preservar a área das pastagens, enquanto a suplementação de volumoso era ofertada diariamente (entre 9h00 e 10h00) para garantir um nível adequado de proteína bruta (PB) e não haver sobras diárias. Os valores nutritivos da silagem [em % da matéria seca (MS)] foram: PB = 8,8; Digestibilidade *in vitro* da MS (D*IV*MS) = 61,14; Fibra em Detergente Neutro (FDN) = 58,59; Fibra em Detergente Ácido (FDA) = 36,62; Matéria Mineral (MM) = 7,26; Extrato Etéreo (EE) = 1,93; e Lignina (LIG) = 2,69. Nos sistemas avaliados, os resultados de GMD dos animais e lotação animal em todos os sistemas integrados (ILP, ILPF e IPF) evidenciam o potencial da suplementação em intensificar a produção, resultando em 0,76, 0,70 e 0,69 kg dia^{-1} e 3,1, 2,8 e 3,2 UA ha^{-1} quando comparados com o sistema a PS com maior nível tecnológico (INT), com 0,73 kg dia^{-1} e 3,6 UA ha^{-1} (dados desagrupados de Oliveira et al., 2022).

Portanto, de forma geral, a oferta de silagem como suplemento volumoso durante a época seca do ano compensou a redução na produção de MS da forragem, impulsionando a performance dos sistemas adotados no estudo (Oliveira et al., 2022a); enquanto o balanço das interações dos componentes (solo, planta, lavoura, animal e floresta) de cada sistema irá definir o nível de produtividade animal de cada um (Nicodemo et al., 2018), e isso irá depender da fertilidade do solo, do manejo das plantas forrageiras, do esquema de rotação entre pastagens e culturas e do nível de sombreamento de cada arquitetura do sistema de produção.

Adicionalmente, os benefícios que irão definir a produtividade animal dos sistemas são fundamentados em melhores práticas de manejo que resultam em maiores produtividades e valores nutritivos das pastagens, especialmente, quando comparados com sistemas a PS. Em sistemas de ILP e ILPF, as vantagens significativas da lavoura incluem: o resíduo das colheitas e a decomposição das culturas, contribuindo para a incorporação de nitrogênio (N) no solo para reduzir a necessidade de utilização de fertilizantes sintéticos (Carvalho et al., 2019; Aranha et al., 2022; Monteiro et al., 2024; Oliveira et al., 2024); assim como para as árvores nos sistemas de IPF e ILPF, incluem: o enriquecimento do solo devido ao acúmulo de matéria orgânica, a maior ciclagem de nutrientes e o aumento da atividade microbiana do solo (Carvalho et al., 2019; Tadini et al., 2021; Meo-Filho et al., 2022; Monteiro et al., 2025; Oliveira et al., 2024).

Durante a Fase 3 do sistema ILPF-Corte, com novo desbaste do componente arbóreo nos sistemas integrados

(para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), a menor população de árvores representa uma oportunidade importante para maximizar a produção animal (Tabela 8.1) (Carvalho et al., 2019; Brunetti et al., 2025b; Santos et al., 2025), permitindo maior passagem de radiação solar para a pastagem, o que possibilita maior produção de biomassa para alimentar os animais, principalmente quando comparado com sistemas de alta densidade (Pontes et al., 2018; Oliveira et al., 2022b; Sousa et al., 2023;). Adicionalmente, Brunetti et al. (2025b), ao comparar com os sistemas a PS com maior e menor nível tecnológico (INT e EXT, respectivamente), concluíram que a densidade reduzida pelo desbaste das árvores no sistema de IPF (165 para 83 árvores por ha) resultou em GMD dos animais e lotação animal semelhantes pelo período de três anos. Nos três anos avaliados, os resultados encontrados de GMD e lotação animal do sistema de IPF foram, respectivamente, 0,42, 0,46 e 0,57 kg dia^{-1} e 2,1, 2,2 e 2,1 UA ha^{-1}, enquanto para os sistemas INT foram 0,49, 0,43 e 0,61 kg dia^{-1} e 2,1, 2,5 e 2,5 UA ha^{-1}, e EXT foram 0,35, 0,53 e 0,48 kg dia^{-1} e 1,3, 1,2 e 1,3 UA ha^{-1}. Portanto, as maiores produtividades por unidade de área alcançadas nesta fase pelos sistemas com menores arranjos arbóreos permitem produzir mais animais na mesma área ou usar menos área de terra para o mesmo número de animais, o que, por sua vez, proporciona aos produtores atingir a demanda por alimentos sem a necessidade de expandir a área agropecuária para áreas de vegetação nativa, ou seja, diminuindo a pressão sobre o desmatamento de áreas florestais (Monteiro et al., 2024; Brunetti et al., 2025a; Santos et al., 2025; Pasquini Neto et al., 2025).

8.2.2.2 Características de carcaça e carne

Após o final de cada período experimental, a partir do abate dos animais experimentais traçadores em abatedouros comerciais, de acordo com as diretrizes de produtos de origem animal (RIISPOA), ocorre a avaliação da carcaça e características da carne. As carcaças são pesadas para obtenção do peso de carcaça quente (PCQ, kg carcaça^{-1}), enquanto o rendimento de carcaça (RC, %) é calculado de acordo com a razão entre o PCQ e o peso vivo (PV) dos animais em jejum (Nassu et al., 2016; Luz et al., 2019)

Em função dos benefícios ao ambiente de criação dos animais, os sistemas ILPF apresentam características de produção de carcaça positivas, com eficiência de conversão tanto em produtividade quanto em qualidade de produto (carne) (Luz et al., 2019; Brunetti et al., 2025a; Pasquini Neto et al., 2025) (Tabela 8.2). Nesse contexto, os estudos de Nassu et al. (2016) e Luz et al. (2019) têm evidenciado que a criação de bovinos de corte em sistemas de ILP e ILPF das raças *Canchim* e *Nelore*, respectivamente, representam alternativas viáveis para a produção de carne, visto que a avaliação dos parâmetros de PCQ, rendimento da carcaça, área de olho de lombo, espessura de gordura, escore de marmoreio e qualidade da carne (incluindo as variáveis de pH, força de cisalhamento, atributos de coloração e perfil de ácidos graxos) são satisfatórios para a aceitação dos consumidores.

Portanto, a intensificação do manejo tem promovido melhorias significativas nos sistemas ILPF, contribuindo para melhores conversões alimentares que não comprometem a qualidade física da carcaça

Tabela 8.2. Característica de carcaça de animais em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) comparados com sistemas pleno sol (PS).

Fonte	Sistemas	PCQ (kg)	RC (%)	Ganho PCQ (kg/ha)
Luz et al. (2019)	ILP	255	57.5	-
	ILPF - 196 árvores/ha	257	57.4	-
	ILPF - 448 árvores/ha	259	56.8	-
Brunetti et al. (2025a)	PS - INT	-	55.8	432
	IPF	-	54.5	362
Pasquini Neto et al. (2025)	PS - DEG	218	49.7	120
	IPF	230	50.3	117

DEG: degradado; EXT: extensivo; ILP: integração lavoura-pecuária; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; INT: intensivo; PCQ: peso de carcaça quente; PS: pleno sol; RC: rendimento de carcaça.

(Luz et al., 2019; Peri et al., 2024). Entretanto, é importante ressaltar que, quando a densidade ou o arranjo das árvores não são planejados de forma técnica, o sombreamento excessivo pode ocorrer, reduzindo a incidência de luz e comprometendo o crescimento e o valor nutritivo das forragens (Oliveira et al., 2022b). Essa limitação leva à redução do desempenho e prejuízos às características de carcaça, limitando o potencial físico da carcaça (Pasquini Neto et al., 2025).

8.2.2.3 Emissões de CH_4 entérico dos animais

Para a avaliação da emissão do metano (CH_4) entérico, os animais experimentais traçadores são avaliados com um sistema de coleta de gases, incluindo cabrestos e cangas de PVC rígidos acoplados ao pescoço e cabeça dos animais (Berndt et al., 2014). Além disso, para a quantificação do gás CH_4 se faz necessário a inserção individual prévia (por ± 14 dias antes de cada período experimental) de cápsulas com o gás traçador SF_6 no rúmen dos animais, que fornece uma pressão negativa para coletar as concentrações dos gases de CH_4 e SF_6 durante todo o período experimental.

Essa avaliação geralmente ocorre em cada estação do ano durante cinco dias consecutivos. Posteriormente, medições em cromatografia são realizadas para a mensuração das concentrações de CH_4 e SF_6, e por meio da técnica desenvolvida por Johnson e Johnson (1995) e adaptada para condições tropicais por Berndt et al. (2014). Nesse contexto, diferentes métricas de intensidade de emissão de CH_4 entérico podem ser obtidas, incluindo:

- CH_4 por animal por dia;
- CH_4 por kg de peso vivo (PV);
- CH_4 por kg de ganho médio diário (GMD);
- CH_4 por kg de ganho de peso vivo por hectare (GPVha);
- CH_4 por kg de peso de carcaça quente (PCQ).

Os sistemas de ILPF oferecem um potencial de mitigação das emissões de CH_4 entérico quando comparados com sistemas a PS, especialmente em intensidade de emissão de CH_4 entérico por kg de produto (Tabela 8.3) (Pontes et al., 2018; Meo-Filho et al., 2022; Oliveira et al., 2022a, Brunetti et al., 2025a; Santos et al., 2025). No entanto, apesar dos benefícios evidenciados, principalmente nas melhorias dos valores nutricionais das pastagens (maior teor de PB) entre os sistemas ILPF, as emissões de CH_4 entéricos são frequentemente seme-

Tabela 8.3. Características de emissão de CH_4 entérico de animais em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) comparados com sistemas pleno sol (PS).

Fonte	Sistemas	CH_4/dia (g/animal/dia)	CH_4/PV (kg/kg)	CH_4/GMD (kg/kg)	CH_4/ha/ano (kg/kg)	CH_4/PCQ (kg/kg)
Pontes et al. (2018)	ILP - 90 kg N ha^{-1}	170.0	0.60	0.247	0.78	-
	ILP - 180 kg N ha^{-1}	166.0	0.57	0.168	0.83	-
	ILPF - 90 kg N ha^{-1}	165.0	0.59	0.286	0.54	-
	ILPF - 180 kg N ha^{-1}	155.0	0.57	0.236	0.51	-
Meo-Filho et al. (2022)	EXT	199.7	0.62	0.47	-	0.50
	INT	226.1	0.58	0.38	-	0.25
	ILP	209.8	0.61	0.34	-	0.30
	IPF	196.7	0.58	0.45	-	0.35
	ILPF	180.9	0.53	0.44	-	0.29
Monteiro et al. (2024)	PS	218.9	-	0.35	0.62	-
	ILP	223.2	-	0.31	0.45	-
	IPF	219.0	-	0.33	0.47	-
	ILPF	221.8	-	0.32	0.60	-
Santos et al. (2025)	PS - EXT	200.0	-	0.29	0.73	0.37
	IPF	180.0	-	0.29	0.66	0.38

EXT: extensivo; GMD: ganho de peso médio diário; ILP: integração lavoura-pecuária; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; INT: intensivo; PCQ: peso de carcaça quente; PS: pleno sol; PV: peso vivo.

lhantes ou ligeiramente superiores devido à complexidade durante a fermentação ruminal e às similaridades entre o peso corporal e as taxas de lotação animal (Guimarães Júnior et al., 2022; Monteiro et al., 2024; Santos et al., 2025).

Por fim, considerando o balanço líquido geral [expresso em dióxido de carbono (CO_2) equivalente], o componente arbóreo dos sistemas de IPF e ILPF são conhecidos como importantes sumidouros de C, representando uma estratégia eficaz para contribuir com o balanço positivo em termos de mitigação das emissões de CH_4 entéricos dos animais (Agethen et al., 2024; Monteiro et al., 2024; Brunetti et al., 2025a; Santos et al., 2025). Portanto, quantificações do estoque de C no solo e na biomassa total das árvores indicam que, ao longo do tempo, os sistemas integrados podem caminhar em direção à neutralidade, compensando parte ou até mesmo a totalidade das emissões de GEE do sistema, podendo inclusive gerar créditos de C (Oliveira et al., 2024).

Nesse contexto, a partir dos dados de emissão de CH_4 entéricos (expressos em g $animal^{-1}$ dia^{-1}) obtidos por Meo-Filho et al. (2022) e das equações alométricas logarítmicas ajustadas e parametrizadas por Pezzopane et al. (2021) para quantificar a biomassa total das árvores nos sistemas ILPF-Corte, é possível estimar o número de árvores necessárias para compensar as emissões de CH_4 entéricos dos animais, utilizando o potencial de aquecimento global (GWP, de 28), conforme diretrizes do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019) (Figura 8.2).

Observa-se na Figura 8.2 a clara diferença entre o potencial de compensação das emissões de CH_4 entéricos dos animais em função do desenvolvimento das árvores (volume e biomassa total) nas diferentes Fases dos sistemas de IPF e ILPF. A Fase 1 (de 2011-2016) apresentou o maior número de árvores necessárias para mitigar a emissão de 1 bovino macho com 341,5 kg de peso vivo médio (média de 43 árvores), seguido pela Fase 2 (2016-2019), apresentando média de ± 28 árvores, e, por último, a Fase 3 (2019-2024), com o menor número de árvores necessárias (média de ± 10 árvores). Por essa razão os projetos consideram o crescimento total do ciclo e realizam a linearização da produção de biomassa total na mesma taxa anual, como realizado por Oliveira et al. (2024), que considerou as taxas nas Fases 1 e 2 do ILPF-Corte para o cálculo do potencial de mitigação das emissões dos GEE pelo crescimento das árvores. Esses resultados reforçam consistentemente o potencial de mitigação de CH_4 entéricos dos animais proporcionado pelo componente arbóreo (Pontes et al., 2018; Oliveira et al., 2022a; Cândido et al., 2024; Santos et al., 2025). Adicionalmente, o planejamento da densidade arbórea é fundamental, e por meio de práticas de manejo (como desramas e desbastes) durante as fases iniciais, o crescimento das espécies cultivadas é otimizado, contribuindo para o maior potencial de neutralização. Portanto, em sistemas com densidades inferiores a 200-155 árvores por hectare é possível verificar balanços positivos significativamente maiores, especialmente quando as emissões são calculadas por unidade de produto animal (Pontes et al., 2018; Santos et al., 2025).

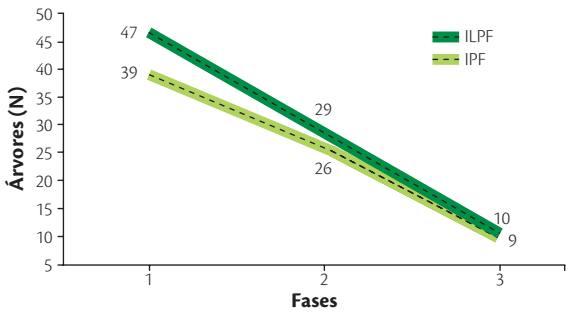


Figura 8.2. Mitigação de CH4 entérico de 1 bovino (peso vivo médio 341,5 kg) por meio do número de árvores ao longo das fases e da idade das árvores do sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte).

Essa maior eficiência dos sistemas ILPF resulta não apenas em menor impacto ambiental por unidade de produto, mas também em melhor uso dos recursos naturais, reforçando o papel dos sistemas integrados na mitigação das emissões de GEE na pecuária tropical, que tem o metano entérico como principal gás envolvido nas emissões (Nicodemo et al., 2018; Santos et al., 2018; Carvalho et al., 2019; Lemes et al., 2021; Paciullo et al., 2021; Aranha et al., 2022; Oliveira et al., 2022a; Guimarães Júnior et al., 2022; Sousa et al., 2023; Agethen et al., 2024; Cândido et al., 2024; Monteiro et al., 2024; Oliveira et al., 2024; Santos et al., 2025).

8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas ILPF representam uma estratégia promissora para a intensificação sustentável da produção de carne bovina no Brasil, oferecendo múltiplos benefí-

cios que vão além da simples produção de alimento. A melhoria na qualidade da forragem contribui para o aumento da eficiência de desempenho, e a inclusão de árvores nas pastagens auxilia a mitigação dos GEE, com o sequestro de C pelas árvores e pelo solo, neutralizando as emissões de CH_4 entérico dos animais, especialmente em sistemas bem manejados.

No entanto, a implementação bem-sucedida dos sistemas ILPF não é isenta de desafios. O manejo da competição por luz entre as árvores e a forragem é o principal desafio, pois o sombreamento excessivo pode comprometer a produção da pastagem e, consequentemente, o ganho de peso por área. A escolha adequada das espécies arbóreas e forrageiras, bem como a densidade e o arranjo das árvores, são determinantes para otimizar os resultados.

Nesse contexto, apesar de alguns resultados serem semelhantes aos de sistemas convencionais a pleno sol, a multifuncionalidade e os serviços adicionais (como a diversificação de produtos, controle de erosão, recuperação de biodiversidade e melhoria da fertilidade do solo) tornam os sistemas ILPF uma opção estratégica e sustentável ao longo do tempo. Ao integrar as dimensões de produção animal e mitigação de CH_4 entérico, os sistemas ILPF não apenas fortalecem a segurança alimentar global, mas também posicionam o Brasil como um líder na produção pecuária de baixa emissão de C.

8.4 REFERÊNCIAS

AGETHEN, K.; MAURICIO, R. M.; DEBLITZ, C.; IZQUIERDO, M. D.; REYES, E.; CHARÁ, J. Future perspectives of Brazilian beef production: what is the role of silvopastoral systems? **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2179-2196, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01005-7.

ARANHA, A. S.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; SANTANA, E. A. R.; LUPATINI, G. C.; ARANHA, A. R.; FONSECA, R.; SEKIYA, B. M. S.; BUENO, L. G. F.; MEIRELLES, P. R. L.; MAESTÁ, S. A.; DA LUZ, P. A.; TRIVELIN, G. A.; CARRIEL, A. C. C.; SANTOS, J. M. F. Seasonal performance and behaviour of Nellore cattle in integrated crop-livestock systems. **South African Journal of Animal Science**, v. 52, n. 3, p. 304-315, 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil.** Brasília, DF, 2022. E-book. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/4966/1/2022_estimativas_anuais_emissoes_gases_efeito_estufa_brasil.pdf. Acesso em: 7 out. 2025.

BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; PEREIRA, L. G. R.; RODRIGUES, P. H. M.; DE ALMEIDA, R. G. **Diretrizes para avaliação da emissão de metano entérico com a técnica do gás traçador SF6.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 19 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 117). E-book. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1021939/diretrizes-para-avaliacao-da-emissao-de-metano-enterico-com-a-tecnica-do-gas-tracador-sf6. Acesso em: 7 out. 2025.

BRUNETTI, H. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; PASQUINI NETO, R.; BERNARDI, A. C. D. C.; DE OLIVEIRA, P. P. A. Productive and nutritive traits of Piatã palisadegrass after thinning the forest component of a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 160, n. 5, p. 338-348, 2022. DOI: http://doi.org/10.1017/S002185962200051X.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

BRUNETTI, H. B.; PASQUINI NETO, R.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; GARCIA, A. R.; PINHO, L. F.; DE SOUSA, A. J. C.; RAMOS, G. G.; DE CAMPOS BERNARDI, A. C.; DE PEDROSO, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Late stages of Tropical silvopastoral system: an opportunity to maximise forage and animal production. **Grass and Forage Science**, v. 80, n. 3, p. e70010, 2025b. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.70010.

CÂNDIDO, A. C. T. F.; SILVA, T. A.; CÂNDIDO, B. U. F.; TAPAJÓS, R.; CHAVES, S. S. N. F.; SILVA, A. R.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C. T.; FERNANDES, P. C. C.; DIAS-FILHO, M. B.; LISBOA, L. S. S.; ALMEIDA, R. G.; MOURA, J. M. S.; BELDINI, T. P.; MARTORANO, L. G. Carbon and methane as indicators of environmental efficiency of a silvopastoral system in Eastern Amazon, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 6, p. 2547, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/su16062547.

CARVALHO, P.; DOMICIANO, L. F.; MOMBACH, M. A.; DO NASCIMENTO, H. L. B.; CABRAL, L. Forage and animal production on palisadegrass pastures growing in monoculture or as a component of integrated crop–livestock–forestry systems. **Grass and Forage Science**, v. 74, n. 4, p. 650-660, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.12448.

CHARÁ, J.; REYES, E.; PERI, P.; OTTE, J.; ARCE, E.; SCHNEIDER, F. **Silvopastoral systems and their contribution to improved resource use and sustainable development goals: evidence from Latin America**. Cali: FAO; CIPAV; Agri Benchmark, 2019. 60 p.

COSTA, J. A. A. da; QUEIROZ, H. P. de. **Régua de manejo de pastagens**: edição revisada. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2017. 7 p. (Embrapa Gado de Corte. Comunicado técnico, 135). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1073783/regua-de-manejo-de-pastagens-edicao-revisada. Acesso em: 7 out. 2025.

DIM, V. P.; ALEXANDRINO, E.; SANTOS, A. C.; MENDES, R. S.; SILVA, D. P. Características agronômicas, estruturais e

bromatológicas do capim piatã em lotação intermitente com período de descanso variável em função da altura do pasto. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 16, n. 1, p. 10-22, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/S1519-99402015000100002.

GUIMARÃES JÚNIOR, R.; DE OLIVEIRA, A. F.; FERREIRA, I. C.; PEREIRA, L. G. R.; TOMICH, T. R.; MENEZES, G. L.; VILELA, L.; LANA, Â. M. Q. Methane emissions and milk yields from zebu cows under integrated systems. **Livestock Science**, v. 263, p. 105038, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105038.

Intergovernmental Panel on Climate Change. **2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva: IPCC, 2019. E-book. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html. Acesso em: 7 out. 2025.

JOHNSON, K. A.; JOHNSON, D. E. Methane emission from cattle. **Journal of Animal Science**, v. 73, n. 8, p. 2483-2492, 1995. DOI: http://doi.org/10.2527/1995.7382483x.

LEMES, A. P.; GARCIA, A. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRANDÃO, F. Z.; WATANABE, Y. F.; COOKE, R. F.; SPONCHIADO, M.; DE PAZ, C. C. P.; CAMPLESI, A. C.; BINELLI, M.; GIMENES, L. U. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 93609, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s41598-021-93609-7.

LUZ, P. A. C.; ANDRIGHETTO, C.; LUPATINI, G. C.; ARANHA, H. S.; TRIVELIN, G. A.; MATEUS, G. P.; SANTOS, C. T.; FRANCISCO, C. D. L.; CASTILHOS, A. M.; JORGE, A. M. Effect of integrated crop-livestock systems in carcass and meat quality of Nellore cattle. **Livestock Science**, v. 220, p. 83-92, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.11.018.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

MONTEIRO, A.; BARRETO-MENDES, L.; FANCHONE, A.; MORGAVI, D. P.; PEDREIRA, B. C.; MAGALHÃES, C. A. S.; ABDALLA, A. L.; EUGÈNE, M. Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. **The Science of the Total Environment**, v. 906, p. 167396, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167396.

MONTEIRO, A.; PEDREIRA, B. C.; ABDALLA, A. L. From policy to practice: the role of integrated production systems in mitigating climate change in Brazil. **Scientific Electronic Archives**, v. 18, n. 3, p. 2062, 2025. DOI: http://doi.org/10.36560/18320252062.

MOTT, G. O.; LUCAS, H. The design, conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6., 1952, State College, PA. **Proceedings** [...]. State College, PA: Pennsylvania State College, 1952. v. 2. p. 1380-1385.

NASSU, R. T.; RAMIZ TULLIO, R.; ESTEVES, S. N.; BERNARDI, A. C. C. Características da carcaça e qualidade da carne de bovinos terminados em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Veterinária e Zootecnia**, v. 23, n. 4, p. 637-641, 2016. DOI: http://doi.org/10.35172/rvz.2016.v23.399.

NICODEMO, M. L. F.; MULLER, M. D.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; CARPANEZZI, A. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BARIONI JÚNIOR, W. Growth of native trees in two agroforestry systems. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 639-648, 2016. DOI: http://doi.org/10.1590/0100-67622016000400007.

NICODEMO, M. L. F.; GARCIA, A. R.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; PACIULLO, D. S. C. **Desempenho saúde e conforto animal em sistemas silvipastoris no Brasil**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. 44 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 129). E-book. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1095705/desempenho-saude-e-conforto-animal-em-sistemas-silvipastoris-no-brasil. Acesso em: 7 out. 2025.

OLIVEIRA, P. P. A. Gases de efeito estufa em sistemas de produção animal brasileiros e a importância do balanço de carbono para a preservação ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 623-634, 2015. DOI: http://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p623-634.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; ALVES, T. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SAKAMOTO, L. S.; HENRIQUE, F. L.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). **Animal**, v. 14, n. S3, p. s427-s437, 2020. DOI: http://doi.org/10.1017/S1751731120001822.

OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; DE MEDEIROS, S. R. **Potencial de produção de carne carbono neutro por bovinos machos da raça Nelore em sistema silvipastoril com capim-piatã e eucalipto: Embrapa Pecuária Sudeste - São Carlos, SP**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2022a. 52 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 142). E-book. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1142219/potencial-de-producao-de-carne-carbono-neutro-por-bovinos-machos-da-raca-nelore-em-sistema-silvipastoril-com-capim-piata-e-eucalipto-embrapa-pecuaria-sudeste---sao-carlos-sp. Acesso em: 7 out. 2025.

OLIVEIRA, A. F.; MENEZES, G. L.; GONÇALVES, L. C.; DE ARAÚJO, V. E.; RAMIREZ, M. A.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; JAYME, D. G.; LANA, Â. M. Q. Pasture traits and cattle performance in silvopastoral systems with Eucalyptus and Urochloa: systematic review and meta-analysis. **Livestock Science**, v. 262, p. 104973, 2022b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104973.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; JÚNIOR, F. P.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic Forest biome, Southeastern of Brazil. **European**

Journal of Agronomy, v. 158, p. 127219, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219.

PACIULLO, D. S. C.; FERNANDES, P. B.; CARVALHO, C. A. B.; MORENZ, M. J. F.; LIMA, M. A.; MAURÍCIO, R. M.; GOMIDE, C. A. M. Pasture and animal production in silvopastoral and open pasture systems managed with crossbred dairy heifers. **Livestock Science**, v. 245, p. 104426, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104426.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; DA SILVA, G. V.; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; PERNA JUNIOR, F.; BERNDT, A.; DE MEDEIROS, S. R.; PEDROSO, A. D. F.; DE OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Performance and feed intake of Nellore steers in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Livestock Science**, v. 294, p. 105667, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2025.105667.

PERI, P. L.; CHARÁ, J.; VIÑOLES, C.; BUSSONI, A.; CUBBAGE, F. Current trends in silvopastoral systems. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 1945-1953, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01093-5.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 39-49, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agrícola**, v. 77, n. 2, p. e20180150, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. 2021. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; DE ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; DE OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. **Agroforestry Systems**, v. 1, n. 7, p. 1, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01038-y.

PONTES, L. S.; BARRO, R. S.; SAVIAN, J. V.; BERNDT, A.; MOLETTA, J. L.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; BAYER, C.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated crop-livestock systems: the effect of shade and nitrogen fertilization. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 253, p. 90-97, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.009.

SANTOS, D. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; VILELA, L.; MACIEL, G. A.; FRANÇA, A. F. S. Implementation of silvopastoral systems in Brazil with Eucalyptus urograndis and Brachiaria brizantha: productivity of forage and an exploratory test of the animal response. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 266, p. 174-180, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.017.

SANTOS, F. C.; KARVATTE JUNIOR, N.; ALMEIDA, R. G.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; VILELA, L.; CASTRO, R. V. O.; ROCHA, A. L. P. F.; SILVEIRA, M. C. T. Intensification of pasture-based livestock systems: environmental benefits, forage availability, nutritional value and Nellore cattle performance. **Agroforestry Systems**, v. 99, n. 4, p. 01177, 2025. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-025-01177-w.

SOUSA, K. T.; DENIZ, M.; DITTRICH, J. R.; HÖTZEL, M. J. Effects of tree arrangements of silvopasture system on behaviour and performance of cattle: a systematic review. **Annals of Animal Science**, v. 23, n. 3, p. 629-639, 2023. DOI: http://doi.org/10.2478/aoas-2023-0002.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN-NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil & Tillage Research**, v. 211, n. e105001, p. 105001, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2021.105001.

Capítulo 9

Conforto e Bem-estar Animal

Alexandre Rossetto Garcia, Joedson Dantas Gonçalves, José Ricardo Macedo Pezzopane, Alberto Carlos de Campos Bernardi, Giovanna Galhardo Ramos, Alda Juliana Castro de Sousa, Lívia Ferreira Pinho



RESUMO: O Brasil é um país expoente na produção de proteínas de origem animal. No entanto, a maioria dos sistemas de produção de bovinos e bubalinos localiza-se geograficamente em regiões que impõem grandes desafios aos animais. Em geral, a produção de bovídeos no Brasil é realizada em áreas de pastagens em monocultura, com mínima presença de arborização. Por isso, os animais criados a campo ficam sujeitos a condições climáticas adversas, como altas temperaturas do ar, umidade relativa e radiação. Esses fatores podem desencadear estresse térmico nos animais, com consequente desequilíbrio no processo termorregulatório dos animais, levando a alterações de fisiologia, de comportamento, os impedindo de expressar seu máximo potencial produtivo. Por isso, sistemas sustentáveis de produção têm sido utilizados nas regiões de clima tropical com o intuito de mitigar os efeitos climáticos adversos, o que inclui ondas de calor. Em destaque, pode-se adotar o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), que associa diferentes atividades produtivas no mesmo espaço. As árvores incorporadas nas pastagens de ILPF promovem enriquecimento ambiental e criam um microclima mais ameno, ao reduzir a temperatura do ar e a incidência de radiação direta sobre os animais, gerando maior conforto térmico. Aproveitando essa condição de maior ambiência, o ILPF reduz a temperatura de superfície dos animais e impacta positivamente no seu comportamento. Os animais criados em ILPF são mais ativos, apresentam maior tempo de pastejo durante o dia e de descanso durante a noite e a madrugada. Ainda, são menos impelidos a buscar os bebedouros, principalmente nas épocas mais quentes, o que reforça o efeito de economia de água para dessedentação do ILPF. O ILPF induz ganhos reprodutivos importantes, com maior preservação dos touros e melhora na sua qualidade seminal, bem como na produção de embriões mais termotolerantes e propensos a crescimento destacado. Por fim, o ganho médio de peso dos animais em ILPF é semelhante ao de sistemas de pastagens pouco sombreadas e bem manejadas,

https://doi.org/10.4322/9786586819427-9

muito embora a menor disponibilidade de forragem no ILPF possa impactar na lotação animal do sistema. Por isso, os sistemas integrados têm mostrado marcantes efeitos positivos na produção de bovídeos, incrementando o bem-estar animal, ao favorecer comportamentos naturais do animal, sua eficiência reprodutiva e desempenho zootécnico.
Palavras-chave: Microclima; Estresse Térmico; Termorregulação; Etologia; Eficiência Reprodutiva.

ABSTRACT: Brazil is a leading country in the production of animal protein. However, most cattle and buffalo production systems are geographically located in regions that pose significant challenges to the animals. In general, cattle production in Brazil is carried out in monoculture pasture areas with minimal tree cover. Therefore, animals raised in the field are subject to adverse climatic conditions, including high air temperatures, high relative humidity, and solar radiation. These factors can trigger heat stress in animals, leading to an imbalance in their thermoregulatory processes and resulting in physiological and behavioral changes that prevent them from expressing their maximum productive potential. Therefore, sustainable production systems have been used in tropical climate regions to mitigate adverse climatic effects, including heat waves. Notably, the integrated crop-livestock-forestry (ICLF) system, which combines different productive activities in the same area, can be adopted. The trees incorporated into ILPF (Integrated Crop-Livestock-Forestry) pastures enrich the environment and create a milder microclimate by reducing air temperature and the incidence of direct radiation on animals, thereby increasing thermal comfort. Taking advantage of this improved environment, ILPF reduces the animals' surface temperature and positively affects their behavior. Animals raised in ILPF are more active, spend more time grazing during the day, and rest at night and in the early morning. Furthermore, they are less compelled to seek water troughs, especially during warmer periods, which reinforces the water-saving effect of ILPF. ILPF induces significant reproductive gains, including greater preservation of bulls and improved semen quality, as well as the production of more thermotolerant embryos with outstanding growth potential. Finally, the average weight gain of animals in ILPF is similar to that in well-managed, lightly shaded pasture systems, although the lower forage availability in ILPF may affect the system's animal stocking rate. Therefore, integrated systems have shown significant positive effects on cattle production, increasing animal welfare by promoting natural animal behaviors, reproductive efficiency, and zootechnical performance.
Keywords: Microclimate; Heat Stress; Thermoregulation; Ethology; Reproductive Efficiency.

9.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado uma potência mundial na indústria pecuária, com quebras de recordes sucessivos na produção de proteínas de origem animal. Dados recentes apontam que o volume de exportações brasileiras de carne bovina em 2024 movimentou US$ 12,8 bilhões (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne, 2024). O país também se destaca na produção de lácteos, sendo o terceiro maior produtor mundial, com mais de 34 bilhões de litros de leite produzidos por ano, com expressivos indicadores econômicos nesse setor (Brasil, 2025). Historicamente, esses números grandiosos têm sido sustentados por sistemas de produção a pasto, em uma conjuntura de condições favoráveis que associa disponibilidade de áreas produtivas e recursos naturais, até o momento, abundantes. Entretanto, mesmo apresentando aspectos favoráveis à criação de rebanhos bovinos e bubalinos, a maior parte do território brasileiro situa-se na zona intertropical, onde as altas temperatura do ar e umidade relativa impõem desafio térmico constante aos animais.

O estresse térmico pelo calor é um entrave à produção animal de alto rendimento. Isso porque, além de estarem sob incidência de clima quente, a maior parte das pastagens brasileiras também sofre com escassez de sombreamento natural (Baena et al., 2019; Garcia et al., 2023). Essa característica é uma consequência direta do modelo de implantação das pastagens adotado há décadas, que previa remoção quase integral de árvores e arbustos nativos, seguida do plantio de espécies forrageiras em monocultura. Por isso, pastagens sem arborização ou pobremente arborizadas são comuns no Brasil, configurando ambientes mais suscetíveis a eventos climáticos extremos e a maiores amplitudes térmicas, tanto para o frio quanto para o calor.

Condições climáticas adversas podem reduzir a eficiência produtiva do rebanho, devido ao desequilíbrio fisiológico dos animais quando em condição de estresse, além de causar alteração no comportamento,

variações no consumo de alimentos e água, e redução nos índices de eficiência reprodutiva (Moraes et al., 2024; Silva et al., 2024). Para mitigar esses efeitos indesejáveis, faz-se necessário incentivar estratégias produtivas que promovam condições mais adequadas de criação (Pereira et al., 2024), amenizem os efeitos do estresse térmico e incrementem o desempenho do rebanho, a fim de garantir a expressão do seu potencial produtivo (Sousa, 2025).

Por isso, os sistemas integrados de produção vêm ganhando destaque na produção animal. O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) é uma das opções que pode contribuir para maior sustentabilidade ambiental, ao combinar os componentes pastoril, agrícola e arbóreo no mesmo espaço (Balbino et al., 2011). Esses sistemas aumentam a biodiversidade local, incrementam o sequestro de carbono, além de promover maior bem-estar animal por meio do sombreamento natural (Figueiredo et al., 2017). De fato, o fornecimento de sombra natural é uma das práticas mais eficientes e econômicas para auxiliar na redução dos efeitos indesejáveis do clima sobre os animais (Giro et al., 2019; Pezzopane et al., 2019). Adicionalmente, o ILPF promove um ambiente produtivo mais alinhado às atuais demandas da sociedade e dos mercados consumidores mais exigentes, que requerem sistemas de produção mais éticos, em que se destaquem a preocupação com o bem-estar animal e a sustentabilidade.

9.2 DESENVOLVIMENTO

9.2.1 Conceito de sistemas integrados

Os sistemas integrados de produção se caracterizam por combinar atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área, seja em consórcio, sucessão ou rotação. Esses sistemas podem ser classificados em: (a) Sistema convencional, em que é realizada a criação de animais em pastagens, seja de forma intensiva ou extensiva; (b) Sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), no qual são combinados os componentes agrícola e pecuário; (c) Sistema de integração pecuária-floresta (IPF), também chamado de sistema silvipastoril, no qual se integram pastagens, animais e o componente arbóreo; (d) Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), também chamado de agrosilvipastoril, o qual combina os três componentes (agrícola, pecuário e florestal) em um único modelo produtivo (Balbino et al., 2011). De forma abrangente, a principal característica desses sistemas integrados é a combinação entre atividades, promovendo benefícios mútuos entre os componentes. Uma representação gráfica dos diferentes sistemas de produção está apresentada na Figura 9.1.

9.2.2 Vantagens da utilização do ILPF

O uso do ILPF busca o desenvolvimento de uma produção de alimentos de maneira sustentável, com uso racional de recursos naturais e maior conservação ambiental (Balbino et al., 2012). Por meio da diversificação, rotação, consorciação e sucessão de culturas, esse sistema promove a execução de diferentes atividades que, quando bem planejadas, entregam produtos que podem ser explorados ou colhidos durante todo o ano. O planejamento do ILPF, e, por conseguinte, do IPF, facilita a distribuição organizada de árvores no terreno, a partir de plantio em arranjos que favoreçam a conservação do solo e da água (Loss et al., 2011). Ainda, a disposição ordenada do componente arbóreo possibilita o trânsito de máquinas e implementos agrí-

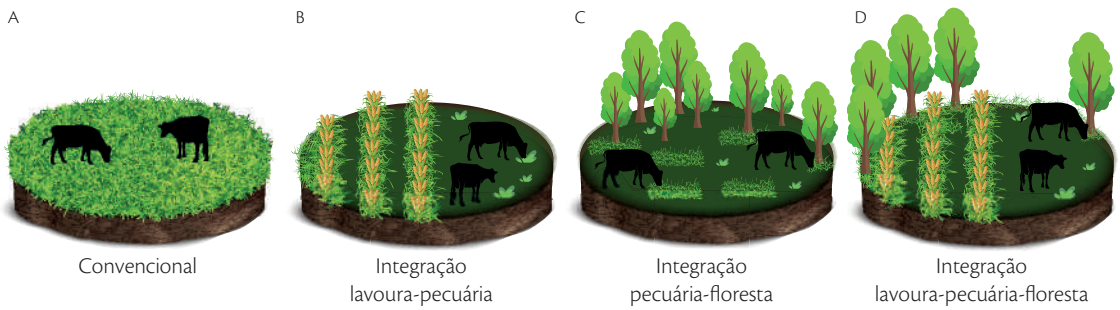


Figura 9.1. Exemplos de diferentes sistemas de produção. (A) Sistema convencional de pastagem em monocultura; (B) sistema de integração lavoura-pecuária (ILP); (C) sistema de integração pecuária-floresta (IPF); (D) sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

colas, facilitando procedimentos de manejo ambiental e de colheita. O ILPF beneficia também as pastagens, pois permite o uso eficiente do solo ao melhorar suas propriedades físicas, químicas e biológicas, além de reduzir a taxa de erosão, a invasão de plantas daninhas e camadas compactadas em pastagens degradadas (Lopes et al., 2009; Assis et al., 2019). No âmbito sustentável, além da produção de madeira, folhas, frutos ou resinas pelas espécies florestais, observa-se redução na emissão de gases de efeito estufa e maior capacidade de sequestro de carbono (Balbino et al., 2011).

Os sistemas integrados também conferem diversas vantagens aos animais. Esses benefícios de conforto térmico são atribuídos principalmente à oferta de sombra natural (Domiciano et al., 2016; Bosi et al., 2020). De fato, a copa das árvores estabelece uma barreira física natural, capaz de filtrar a passagem da radiação solar direta, o que protege os animais e reduz seu ganho de calor exógeno. Por óbvio, a taxa de retenção da radiação depende do arranjo espacial usado no estande de árvores e da densidade arbórea adotada. Porém, em sistemas integrados equilibrados, com árvores já em fase adulta, uma redução de até 30% na incidência de radiação solar direta é relatada (Karvatte Junior et al., 2016). Por isso, a presença do componente arbóreo promove microclima mais ameno, gerando um ambiente mais confortável para os animais, que passam mais tempo em áreas sombreadas e apresentam comportamentos menos indicativos de desafio térmico (Giro et al., 2019). Em adição, o sombreamento também influencia positivamente os ciclos de descanso e alimentação dos animais (Barreto et al., 2022; Moraes et al., 2024), favorecendo a expressão de comportamentos naturais essenciais (Titto et al., 2011).

O componente arbóreo altera a temperatura do ar e a umidade relativa nas pastagens (Karvatte Junior et al., 2016). Em experimentos conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, observou-se redução de até 1,0 °C na temperatura do ar em pastagens de ILPF (Romanello et al., 2023). Além disso, a presença das árvores nas pastagens reduz a temperatura de globo negro em cerca de 3,0 °C no inverno (Giro et al., 2019) e 3,4 °C no verão (Romanello et al., 2023). As maiores diferenças na temperatura do ar entre sistemas sombreados e não sombreados são verificadas entre 13h00 e 16h00 (Barreto et al., 2022; Moraes et al., 2024). Vale ressaltar que os benefícios gerados por esses sistemas podem ter impactos diferentes entre genótipos, sendo mais evidentes em animais taurinos (*Bos taurus*), compostos e cruzados, do que em animais zebuínos (*Bos indicus*), porém todos, independentemente do genótipo, se beneficiam pela otimização no conforto térmico (Gaughan et al., 2009).

O efeito protetor das árvores sobre os animais traz ganhos significativos (Giro et al., 2019), uma vez que em condição de prolongada elevação da temperatura ambiente o animal necessita mobilizar parte de sua energia metabólica para realizar termorregulação corpórea (Collier; Gebremedhin, 2015), o que dificulta a expressão de seu máximo potencial genético para produção (Fernandez-Novo et al., 2020). Além disso, a adoção desse sistema também permite a expressão natural do comportamento normal desses bovinos e eleva a sua produtividade (Alves, 2012) por minimizar os efeitos negativos gerados pela intensa carga térmica à qual os animais criados em pastagens com pouca oferta de sombreamento são submetidos (Garcia et al., 2011). As principais vantagens atribuídas à utilização dos sistemas integrados podem ser observadas em fluxograma apresentado na Figura 9.2.

9.2.3 Efeitos positivos da adoção do ILPF no ambiente

O ILPF promove alterações no ambiente devido à criação de um microclima mais favorável aos animais, por meio de alterações nos índices climáticos, como temperatura do ar, temperatura de globo negro, umidade relativa do ar, velocidade do vento, carga térmica radiante (CTR) e índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU). Esses índices permitem avaliar a condição térmica do ambiente e predizer os efeitos do microclima sobre os animais. Na Tabela 9.1 é mostrado um comparativo entre sistemas de produção de bovinos com pastagens não sombreadas e em integração lavoura-pecuária-floresta, considerando as variáveis climáticas ao longo de um ano de estudo.

A CTR é uma variável que quantifica a radiação total recebida pelo animal em relação ao ambiente ou ao espaço em que ele se encontra (Souza et al., 2002). A CTR é um indicador para avaliação de conforto térmico animal que incorpora a radiação total recebida pelo globo negro advinda do ambiente ou parte circundante (Moraes et al., 2014). Ao estudar as características microclimáticas do sistema ILPF durante 12 meses, Gonçalves et al. (2025) observaram que a

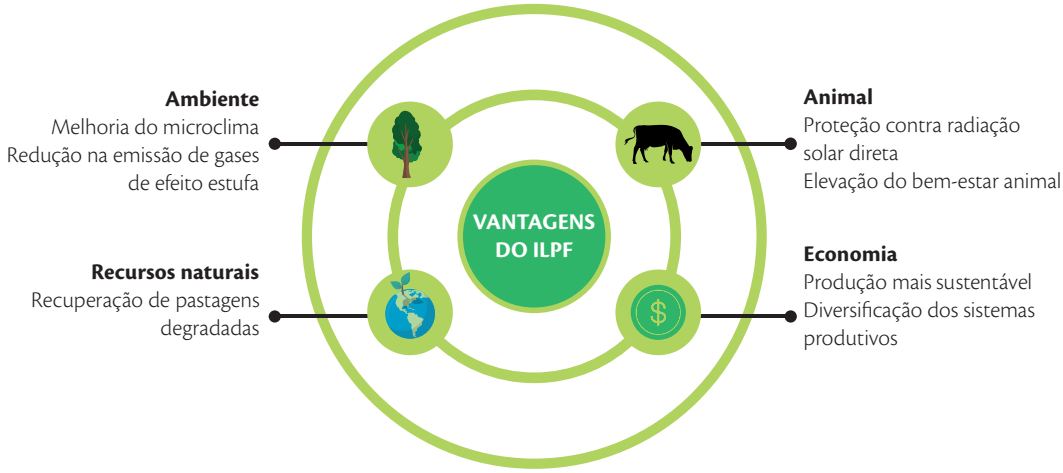


Figura 9.2. Principais vantagens observadas a partir da utilização dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nas propriedades rurais.

Tabela 9.1. Valores médios (±erro-padrão) de temperatura do ar (TA), temperatura de globo negro (TGN), umidade relativa (UR), velocidade do vento (VV), índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU) e carga térmica radiante (CTR), registrados em sistemas de pastagens não sombreadas (NS) e em integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), em região de clima tropical.

Variáveis*	Sistemas		P-valor
	NS	ILPF	
TA (°C)	24,7 ± 0,1[a]	24,1 ± 0,1[b]	0,001
TGN (°C)	32,8 ± 0,2[a]	29,0 ± 0,2[b]	<0,0001
UR (%)	61,6 ± 0,9	63,9 ± 0,9	ns
VV (m/s)	2,0 ± 0,02[a]	1,4 ± 0,0[b]	<0,0001
ITGU	80,0 ± 0,2[a]	76,2 ± 0,2[b]	<0,0001
CTR (W/m^2)	654,1 ± 3,3[a]	551,6 ± 3,3[b]	<0,0001

Letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa. *Com base em dados registrados das 8h00 às 18h00. [ns] Não significativo.
Fonte: Adaptado de Romanello et al. (2023).

temperatura de globo negro, a velocidade do vento, a carga térmica radiante e o índice de temperatura de globo negro e umidade apresentaram valores menores quando comparados a áreas não sombreadas. Nesse contexto, Barreto et al. (2022) também observaram redução significativa da CTR em sistema ILPF, destacando que a presença de árvores é essencial para a mitigação do calor excessivo. Na Figura 9.3, pode-se observar as variáveis climáticas de um sistema ILPF comparativamente a um sistema não sombreado, com uma interessante análise acerca das diferenças dos índices entre os sistemas, nos diferentes horários. Esses resultados foram corroborados por Moraes et al. (2024), que verificaram diminuição de 11,2% na CTR em sistema de ILPF, comparativamente a pastagens não arborizadas, principalmente em períodos do dia de radiação solar mais intensa.

Um índice mais abrangente e também utilizado para avaliar o conforto térmico é o ITGU, sendo considerado mais preciso na indicação do estresse térmico de animais criados em campos abertos, onde os efeitos da radiação solar ou da movimentação do ar são expressivos. O ITGU integra em um único indicador os efeitos de energia radiante, da temperatura e da velocidade do vento, os quais são fatores importantes e que têm relação direta com o conforto animal (Buffington et al., 1981). Analisando o efeito do ITGU no conforto térmico de bovinos, Baêta e Souza (2010) estabeleceram que o valor igual a 79 é previsto como limite superior do conforto térmico, a partir do qual os animais necessitam ativar mecanismos fisiológicos e comportamentais para dissipar calor. Segundo esses autores, valores de ITGU abaixo de 74 são indicativos de situação de conforto térmico; valores de 74 a 78 indicam uma situação de alerta; valores de 79 a 84 indicam condição de perigo; e ITGU acima de 84 indica condição de emergência (Baêta; Souza, 2010). Em sistemas de ILPF, os valores de ITGU frequentemente permanecem abaixo do limite de alerta (Pezzopane et al., 2019).

A presença do componente arbóreo no sistema de ILPF reduz a velocidade do vento devido à barreira física criada pelos troncos e pelas copas das árvores (Romanello et al., 2023), o que dificulta o livre deslo-

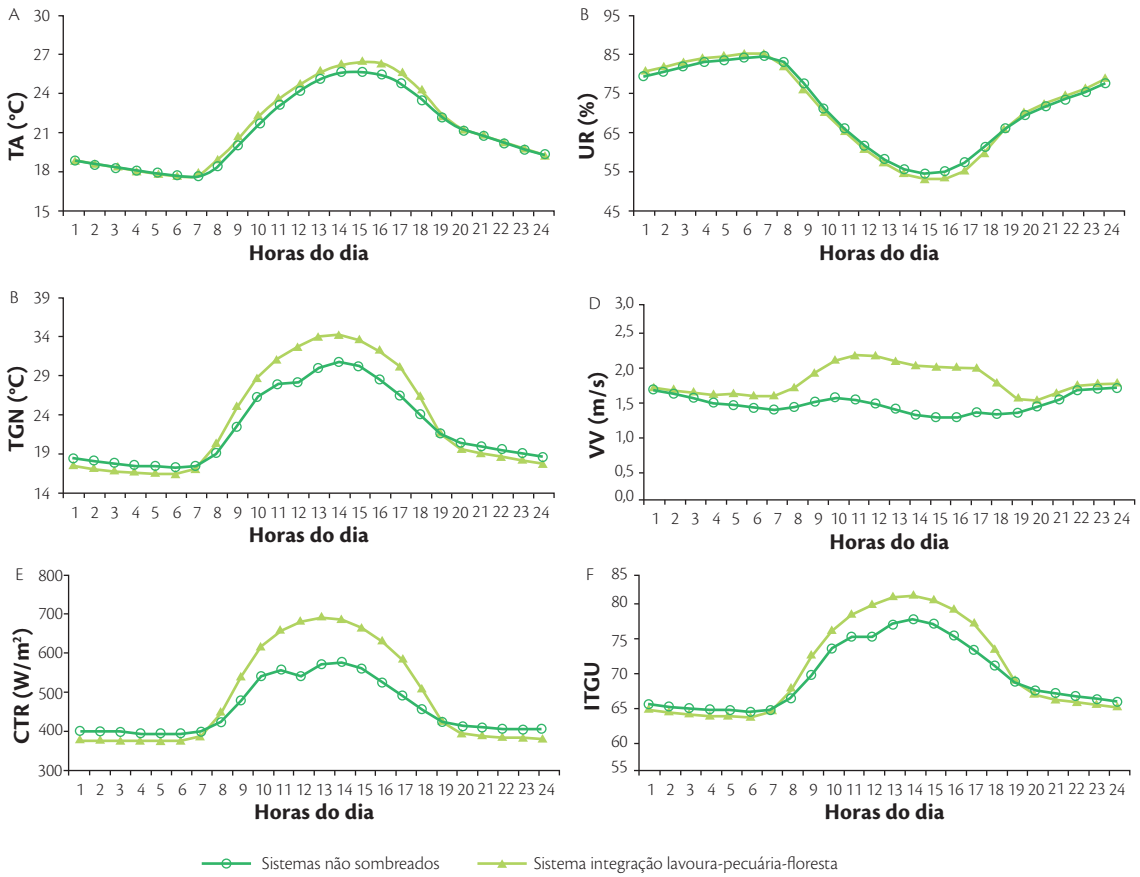


Figura 9.3. Médias horárias de variáveis climáticas registradas em sistemas não sombreados (NS) e em integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). (A) Temperatura do ar (TA); (B) Umidade relativa (UR); (C) Temperatura de globo negro (TGN); (D) Velocidade do vento (VV); (E) Carga térmica radiante (CTR); (F) Índice de temperatura de globo negro e umidade.

Fonte: Barreto et al. (2022).

camento das massas de ar em alturas inferiores ao dossel. Esse efeito "quebra-vento" pode ser, a princípio, imaginado como negativo, por desfavorecer a troca de calor por convecção na superfície corpórea dos animais. Contudo, pode ser importante para amenizar os efeitos de oscilações climáticas bruscas dentro do sistema de produção, e proteger os animais principalmente em situações de ondas de frio. Nesses casos, o componente arbóreo mantém a temperatura do ar mais estável nas pastagens, além de servir como abrigo natural contra os ventos frios. Isso favorece a manutenção da homeotermia dos animais, principalmente daqueles com menor escore de condição corporal e animais mais jovens, ambos casos em que há risco de morte por hipotermia. De fato, recentes episódios de frentes frias que alcançaram abruptamente a região central do Brasil causaram a morte de centenas de animais, principalmente em áreas de pastagens em campo aberto e desprovidas de arborização (Mato Grosso do Sul, 2023).

Outra característica marcante do sistema ILPF é sua capacidade de reduzir a temperatura de superfície nas áreas de pastagens e evitar a formação de "ilhas de calor", fenômeno bem conhecido nas zonas urbanas e que vem sendo mais recentemente estudado no ambiente agrícola. Esse efeito foi comprovado por monitoramento realizado com câmera termográfica por infravermelho embarcada em avião. No estudo, pastagens com mínimo sombreamento e pastagens em ILPF foram avaliadas em sobrevoos quinzenais, durante doze meses consecutivos. Ao considerar os termogramas de cada estação climática, notou-se evidente diferença de temperatura entre os sistemas de produção. O sistema com componente arbóreo apresentou temperaturas mais baixas. Por sua vez, no sistema não arborizado foram identificadas zonas

térmicas específicas, com temperaturas de superfície homogeneamente mais elevadas, acima de 35,0 °C, as quais corresponderam a áreas com menor cobertura vegetal e maior exposição do solo. Essas regiões formam ilhas de calor às quais os bovinos ficam involuntariamente submetidos e são incapazes de se desvencilhar, pois ao longo do tempo necessitam percorrer toda a extensão do sistema produtivo em busca de alimento. A formação das ilhas de calor interfere negativamente na ambiência dos animais ao alterar não somente a capacidade de evapotranspiração do sistema, mas também a radiação difusa recebida pelo animal, reduzindo o conforto térmico. Na Figura 9.4, apresenta-se um exemplo real de constatação da formação de ilhas de calor em sistema de pastagem não sombreado, quando comparado ao sistema ILPF, durante o outono.

9.2.4 Efeitos do ILPF no conforto térmico animal

A ambiência é primariamente definida como o meio físico em que vive um animal. Contudo, a ambiência abrange também o conjunto de fatores ambientais que influenciam o bem-estar dos animais, além da interação entre estes e o ser humano. A ambiência engloba, portanto, aspectos como temperatura, umidade, qualidade do ar, iluminação, ruído e interação social, entre outros. Assim, a ambiência representa a relação bidimensional entre todos os parâmetros climáticos e estruturais do meio, em diferentes escalas, e que resulta em um ambiente mais ou menos agradável. Nesse sentido, o bem-estar dos animais de produção e o conforto proporcionado pelo ambiente têm se tornado temas presentes no cotidiano dos consumidores de produtos de origem animal, seja no mercado doméstico, seja no mercado de exportação.

Os bovinos são animais homeotérmicos, ou seja, capazes de manter sua temperatura interna corporal constante, independentemente das variações climáticas, dentro de certos limites fisiológicos (Martello et al., 2004). A manutenção da temperatura corporal ocorre através da troca de calor do animal com o ambiente, a partir de mecanismos fisiológicos, metabólicos e comportamentais. Nos bovinos, a temperatura interna corpórea é considerada normal quando se encontra entre 37,5 °C e 39,3 °C (Silva, 2000). Para os búfalos domésticos (*Bubalus bubalis*) adultos criados em ambiente tropical, considera-se normal a faixa de temperatura interna entre 38,1 °C e 39,3 °C (Garcia, 2013). Quando a temperatura interna se eleva de forma exacerbada

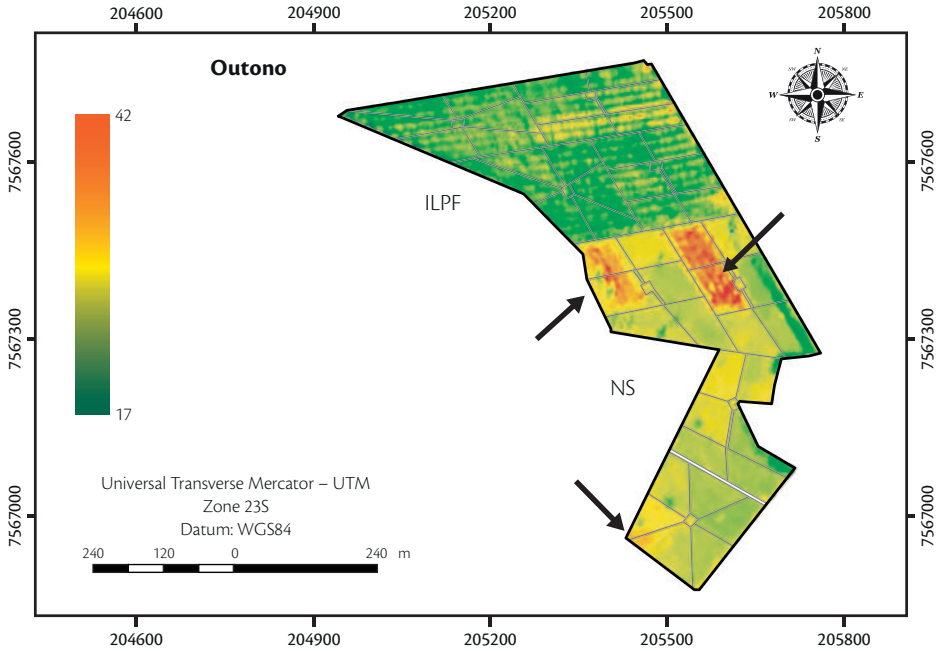


Figura 9.4. Mapa térmico gerado por termografia infravermelha de pastagens não sombreadas (NS) e em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), a partir de sobrevoos com aeronave tripulada durante o outono, em região tropical (São Carlos-SP). As setas indicam áreas do sistema sem arborização com extensões homogêneas de temperatura de superfície mais elevada, formando ilhas de calor nas pastagens.

Fonte: Garcia et al., 2023.

e supera esses limites, os animais são considerados em condição de hipertermia.

Isso acontece quando a carga térmica total, que corresponde ao calor produzido pelo próprio animal mais o calor do ambiente, excede a capacidade do animal de dissipar energia térmica. Em outras palavras, o animal acumula mais calor, sendo incapaz de equilibrar sua temperatura interna. Nos animais homeotérmicos, esse fenômeno se relaciona diretamente com os efeitos da zona de conforto térmico (ZCT). Esta representa a faixa de temperatura ambiente na qual os animais se sentem confortáveis, mantendo a temperatura corporal estável com o mínimo esforço dos mecanismos termorreguladores. Para animais em pastejo, a ZCT é delimitada pelas temperaturas críticas superior (TCS) e inferior (TCI) registradas no ambiente pastoril. Quando o animal se encontra dentro da ZCT, o balanço térmico é idealmente nulo; assim, o calor que o organismo produz mais o obtido do ambiente é igual ao calor dissipado pelo animal. Com isso, o sistema termorregulador do animal não é acionado, e o gasto de energia para a manutenção do equilíbrio térmico é mínimo, fazendo com que mais energia seja particionada para processos como crescimento corporal, manutenção da gestação e produção de leite, por exemplo.

No caso de animais submetidos a uma temperatura menor que a TCI, considera-se que o animal esteja em condição de desconforto pelo frio. Esta pode evoluir para estresse por frio, caso a temperatura do ambiente decline progressivamente e o animal não seja capaz de compensar sua hipotermia, seja pela ativação do seu metabolismo, seja pela ocorrência de tremores involuntários. Quando a temperatura ambiente supera a TCS, é caracterizado o desconforto por calor, que pode evoluir para a condição de estresse térmico (Silva, 2000). Na condição em que a temperatura ambiente supera a TCS, o gradiente de temperatura entre o animal e o meio externo torna-se pequeno para que ocorra resfriamento pelos mecanismos não evaporativos, a partir de quando a sudorese e/ou a respiração se tornam as principais vias responsáveis por 80% da dissipação de calor corporal. Segundo Baêta e Souza (2010), os limites da ZCT para bovinos europeus adultos se situam entre -1 °C e 16 °C, para zebuínos adultos entre 10 °C e 27°C, e para bovinos recém-nascidos entre 18 °C e 21°C. Diante desses limiares, é evidente que em regiões tropicais há maior tendência de os animais sofrerem com o estresse térmico por altas temperaturas, fazendo com que sejam ativados seus mecanismos de termólise, alguns desses com gasto de energia metabólica (Avendano et al., 2006).

Como já visto, o sistema ILPF, por meio do componente arbóreo, cria um microclima mais ameno e confere conforto térmico aos animais. Contrariamente, quando em condição de estresse térmico pelo calor, o animal apresenta respostas fisiológicas adaptativas que envolvem vasodilatação periférica, aumento da sudorese, incremento da frequência respiratória e redução do metabolismo energético. Como esses são mecanismos ativos e envolvem gasto de energia, o estresse térmico é uma condição que reduz a produtividade dos bovinos, fato agravado pelo recente aumento na frequência das ondas de calor intenso (Zilli et al., 2020). Na Figura 9.5, é apresentado um fluxograma sobre como o estresse térmico pode impactar nos processos fisiológicos e comportamentais de uma vaca leiteira.

Além das respostas fisiológicas já citadas, um parâmetro que vem ganhando interesse em ser monitorado é a temperatura de superfície dos animais. Devido ao recente desenvolvimento tecnológico e à popularização da termografia infravermelha, as câmeras termográficas portáteis de alta resolução têm se tornado mais acessíveis a técnicos e produtores. A temperatura de superfície corpórea tem grande relevância quando se considera que a transferência de energia térmica do animal para o meio é um fenômeno físico, dependente do gradiente de temperatura entre a superfície do corpo e o meio circundante. A temperatura de superfície pode também dar indicativo, em tempo real, sobre a absorção da radiação por parte de um animal e o acúmulo de calor, o que pode configurar condição adversa em clima tropical. Na Figura 9.6, pode-se observar os mapas térmicos de animais mantidos em sistemas não sombreados ou em ILPF, evidenciando maior acúmulo de energia térmica e, consequentemente, maiores valores de temperatura de superfície corporal em animais mantidos em pastagens sem arborização. Dessa forma, a implementação de estratégias de sombreamento natural nas pastagens é uma das principais medidas para a modificação do ambiente local, a fim de poupar o animal de incremento calórico excessivo, prevenir o estresse térmico e mitigar os efeitos das ondas de calor.

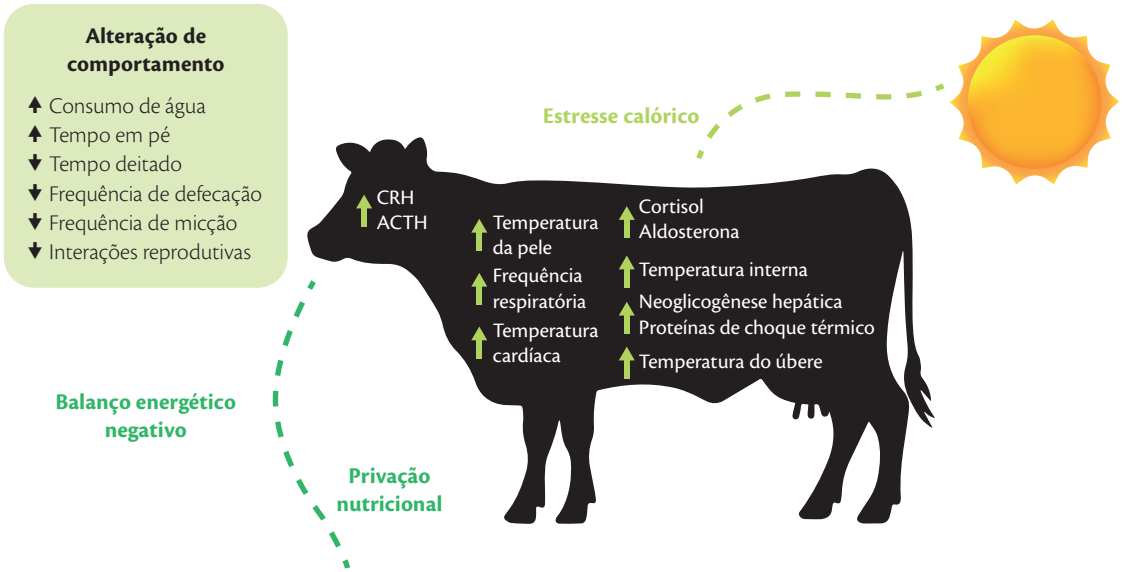


Figura 9.5. Efeitos do estresse pelo calor em bovinos leiteiros. A radiação solar e o calor excessivo provocam alterações fisiológicas e comportamentais nos animais, além de respostas metabólicas e hormonais específicas que prejudicam a saúde do animal e seu desempenho produtivo.

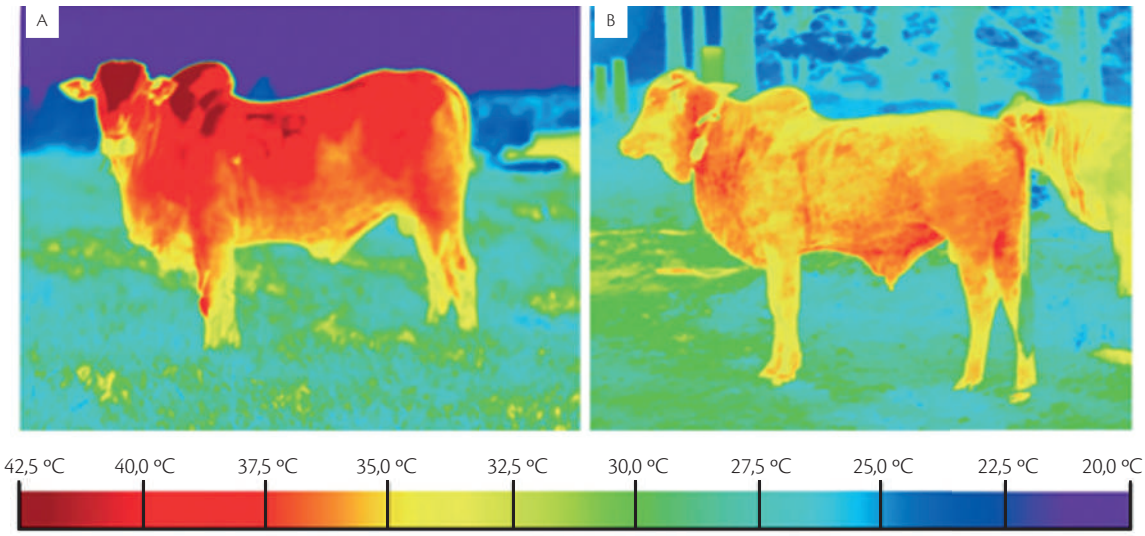


Figura 9.6. Imagens ilustrativas obtidas por termografia infravermelha no mesmo horário do dia, indicando a diferença das temperaturas de superfície de bovinos mantidos a pasto, em sistemas de produção não sombreado (A) e em sistema ILPF (B). Termogramas parametrizados para paleta de cores Rainbow e escala térmica de 20,0 °C a 42,5 °C. Destaque para as temperaturas observadas no animal do sistema não sombreado, as que suplantaram 40,0 °C nas regiões do dorso e da fronte.

9.2.5 Efeitos do ILPF nas variáveis reprodutivas

As atividades reprodutivas dos animais podem ser negativamente afetadas pelas altas temperaturas do ambiente, como consequência direta do desequilíbrio dos mecanismos termorregulatórios, quando o desafio térmico é muito intenso e/ou muito prolongado. Nos touros, ambientes inadequados podem comprometer a qualidade seminal devido à redução da cinética espermática (Kastelic et al., 2001) e ao aumento da porcentagem de defeitos morfológicos dos espermatozoides (Garcia, 2004; Menegassi et al., 2015), o que reduz a fertilidade do reprodutor.

Os testículos são órgãos contidos no escroto, uma estrutura em formato de bolsa, externa à cavidade

abdominal, e que favorece a manutenção da temperatura local de 2 °C a 6 °C mais baixas que a temperatura interna corpórea e a produção normal de gametas (Kastelic et al., 1996). A redução da temperatura escroto-testicular é realizada pela ação integrada do plexo pampiniforme (responsável por refrigerar o sangue arterial antes que chegue nos testículos), da túnica dartos e músculo cremaster (camada de tecido conjuntivo e musculatura que atuam para aproximar ou afastar o escroto da cavidade abdominal) e das glândulas sudoríparas escrotais (responsáveis pela sudorese escrotal) (Kastelic et al., 1997; Hansen, 2009).

Segundo Skinner e Louw (1966), a temperatura ambiente crítica para prejuízo da espermatogênese está entre 27 °C e 32 °C, e exposições contínuas a temperaturas acima de 30 °C podem prejudicar sobremaneira a produção espermática. O aumento de temperatura causa desequilíbrio na termorregulação testicular, promove o aumento do metabolismo testicular e, consequentemente, reduz o aporte sanguíneo local (Waites, 1970), podendo levar à hipóxia celular (Alves et al., 2016). Ainda, a hipertermia por si só pode levar a um conjunto de alterações no parênquima testicular, ocasionando danos às células da linhagem germinativa, diminuição na funcionalidade do órgão e queda da fertilidade (Garcia, 2017).

Por isso, a hipertermia testicular é a causa mais comum de degeneração testicular em touros, e pode ser ocasionada pelo aumento de temperatura ambiente (Kastelic et al., 2001), principalmente em animais menos adaptados aos climas quentes. Dessa forma, a elevação da temperatura ambiente pode causar danos testiculares (Garcia, 2018; Romanello et al., 2018). Consequentemente, a função testicular pode ser comprometida, levando a alterações no tamanho e no volume dos testículos, devido aos prejuízos causados ao tecido responsável pela espermatogênese. Touros mantidos em pastagens não sombreadas apresentam na ultrassonografia em modo B maior incidência de pontos hiperecoicos no parênquima testicular (Romanello et al., 2018), demonstrando que animais submetidos a altas temperaturas do ar podem desenvolver alterações testiculares. Em estudo ultrassonográfico complementar, touros mantidos em pastagens com pouco sombreamento natural apresentaram menor volume gonadal, além de maior hiperecogenicidade do parênquima testicular, fenômeno observado tanto em touros zebuínos como em touros compostos (Romanello et al., 2024). Nos machos afetados por hipertermia testicular crônica, pode-se observar testículos flácidos, de volume reduzido e, em casos mais severos, atrofia testicular (Garcia, 2004).

O aumento da temperatura testicular pode ocasionar elevação do metabolismo celular nos túbulos seminíferos, promovendo maior produção de espécies reativas de oxigênio e estresse oxidativo, o que desencadeia um mecanismo de morte programada das células da linhagem espermática (Ahmad; Noakes, 1995). Esse desbalanço fisiológico atinge principalmente as células mais sensíveis da linhagem germinativa, como os espermatócitos secundários e espermátides alongadas, as quais originarão gametas estruturalmente e funcionalmente deficientes (Gonçalves et al., 2021). Consequentemente, a embriogênese pode ser afetada, pois embriões gerados a partir de gametas masculinos sob estresse térmico apresentam reduzida capacidade de desenvolvimento (Hansen, 2009). Também é relatado que quando machos sob estresse térmico são acasalados, os fetos gerados são menores, comparativamente a machos que não passaram por estresse térmico (Jannes et al., 1998). Além disso, o estresse pelo calor pode ocasionar alterações nas concentrações plasmáticas de testosterona (Marai et al., 2002) e dos hormônios tireoidianos (Renaudeau et al., 2003; Silva et al., 2014) nos animais afetados.

A temperatura da superfície escrotal pode dar excelentes indicativos acerca da atividade da termorregulação testicular (Coulter et al., 1988). Em geral, o gradiente de temperatura entre os polos dorsal e ventral dos testículos é de 1,6 °C para bovinos Nelore (Romanello et al., 2024) e para bubalinos (Silva et al., 2017) criados em regiões tropicais, enquanto a temperatura intratesticular é mais homogênea. Por sua vez, o gradiente térmico entre o escroto e os testículos é de 4,8 °C em bovinos (Kastelic et al., 1996). Esses indicadores térmicos podem variar de acordo com a estação climática, pois touros avaliados ao longo do ano apresentam temperaturas escrotais mais elevadas durante o verão, o que contribui para a redução do gradiente térmico entre os polos testiculares, e, consequentemente, promove a diminuição nos valores de motilidade progressiva espermática nos ejaculados (Menegassi et al., 2015). Nesse contexto, importante notar que o acesso à sombra faz com que touros apresentem menor temperatura subcutânea escrotal, principalmente em condições de altas temperaturas

ambientes (Shahat et al., 2023), o que favorece a indicação do uso do ILPF na mitigação do calor excessivo na criação de touros, bem como para a preservação da sua qualidade seminal.

Em fêmeas, o estresse calórico causado pelas altas temperaturas também gera problemas. Durante períodos de estresse pelo calor, a ativação do eixo hipotálamo-hipofisário-adrenal, embora crucial para a homeostase, exerce efeitos supressores sobre a reprodução. O cortisol, hormônio final deste eixo, inibe a secreção de GnRH pelo hipotálamo e reduz a sensibilidade da hipófise a esse hormônio, resultando em redução da frequência e da amplitude de liberação dos hormônios folículo estimulante (FSH) e luteinizante (LH). Essa ação em cadeia afeta diretamente o ciclo estral, tanto na sua duração como na intensidade de manifestação do estro, decorrente da função anormal dos ovários. O efeito derradeiro do estresse pelo calor se traduz em baixas taxas de concepção e de prenhez (Dobson et al., 2001), o que reduz a fertilidade do rebanho e impacta negativamente a economicidade do sistema.

Nas fêmeas bubalinas, o estresse calórico também desencadeia reações indesejáveis, levando à baixa fertilidade. Nessa espécie, quando criada em zona tropical, há uma chance de 72% das concepções ocorrerem pela manhã, contra 46% à tarde, sendo o estresse térmico um dos principais responsáveis pela baixa concepção de búfalas à tarde, devido ao calor acumulado ao longo do dia (Baruselli, 1994). Tal qual acontece nos bovinos, a influência das variáveis climáticas sobre a concepção de búfalas é mais elevada em períodos chuvosos (Cuong et al., 1994). Esse fenômeno não é observado somente no Brasil, mas também na Índia, de modo que a concepção é mais alta (40,1%) quando as temperaturas do ar são mais baixas, em comparação com os períodos de temperaturas moderadas (38,1%) e altas (12,6%) (Jain; Tailor, 1995).

Em fêmeas bovinas, Lemes et al. (2022) avaliaram a expressão gênica de embriões produzidos in vitro a partir da aspiração de ovócitos de vacas primíparas mantidas em sistemas de pastagens pouco sombreadas ou em ILPF. Para evitar confundimento com o efeito paterno, todos os embriões foram produzidos a partir de sêmen do mesmo touro. Como resultado, foi observada maior expressão gênica nos embriões de vacas mantidas em sistema arborizado, principalmente quanto a genes relacionados ao metabolismo e desenvolvimento embrionário, e na manutenção da pluripotência e autorrenovação de células-tronco embrionárias. Isso evidencia que o sistema de criação naturalmente sombreado pode interferir positivamente na qualidade dos embriões produzidos a partir de vacas que sejam mantidas em condição de maior conforto térmico. Os resultados de expressão gênica relacionados à qualidade embrionária podem ser observados na Figura 9.7.

9.2.6 Efeitos do ILPF no comportamento animal

O conhecimento empírico de que o ambiente interfere na maneira como os bovinos se comportam existe desde a domesticação dos animais, há aproximadamente 10 mil anos no Oriente Médio. O comportamento natural é definido quando o animal realiza livremente suas atividades, o que lhe proporciona prazer e promove o adequado funcionamento fisiológico. Nesse contexto, qualquer restrição gerada por um fator estressor, dentre os quais os elementos do ambiente, pode causar alterações significativas no comportamento, na psique e na fisiologia animal. Com isso, os animais buscam controle alternativo sobre o ambiente, desenvolvendo comportamentos regulatórios específicos para se afastarem ou se protegerem do agente estressor, e, em caso de estresse térmico, para promover perda de calor. Por isso, estudos vêm sendo modernamente realizados com o intuito de avaliar a relação entre as variáveis climáticas, o conforto térmico e o comportamento animal em áreas de pastagem. Essas pesquisas buscam ampliar o conhecimento sobre quais comportamentos animais são estereotipados, bem como identificar como os animais individualmente respondem às variações de microclima. Adicionalmente, visam, a partir da análise das atitudes dos animais, graduar as diferentes zonas de conforto térmico no ambiente de produção, sendo importantes para identificar indivíduos mais termotolerantes e também para implementar novas práticas de manejo ambiental e animal.

Altas temperaturas e umidade relativa, intensa radiação solar, níveis elevados de ruído, atitudes aversivas, dentre outros, são elementos que afetam diretamente o comportamento e a fisiologia dos animais domésticos. Por isso, uma das formas de avaliar como os animais respondem diretamente às condições ambientais é a observação do seu comportamento (Schütz et al., 2010). Comumente, os indicadores comportamentais avaliados nos animais são a ingestão de alimentos e de água, a ruminação, a deambulação, o repouso, as interações sociais, além

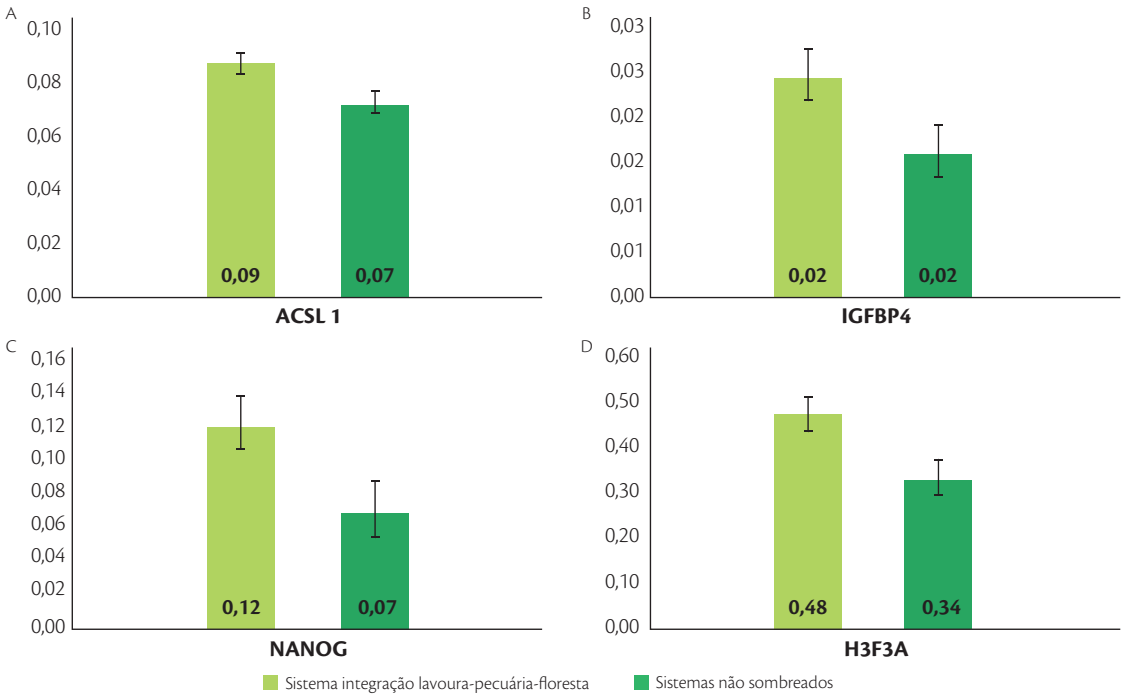


Figura 9.7. Avaliação da expressão de genes sinalizadores de qualidade embrionária, estresse por calor, metabolismo e desenvolvimento em embriões produzidos in vitro a partir de oócitos aspirados de vacas de corte mantidas em sistemas ILPF ou não sombreado (NS). (A) Gene ACSL1, envolvido no processo de metabolismo lipídico; (B) Gene IGFBP4, relacionado à qualidade embrionária, por participar do crescimento e desenvolvimento celular; (C) Gene NANOG, relacionado à qualidade embrionária, atua na manutenção da pluripotência e autorrenovação de células-tronco embrionárias; (D) Gene H3F3A, envolvido no processo de regulação epigenética.
Fonte: Adaptado de Lemes et al. (2022).

da procura por áreas com maior ou menor grau de sombreamento. Quando submetidos a estresse térmico, os animais alteram seu comportamento habitual a fim de reduzir a quantidade de calor endógeno produzido e favorecer a dissipação de calor (Schütz et al., 2011). Uma das alterações de comportamento que primeiramente se manifesta é a redução na atividade de pastejo, o que, por conseguinte, diminui a ingestão de matéria seca e compromete o ganho de peso (Soren, 2012; Mellado et al., 2016). Além disso, as atividades diárias dos animais a pasto envolvem períodos alternados de pastejo, ócio e ruminação, sendo a duração e a distribuição dessas atividades influenciadas por diversos fatores, dentre estes as condições climáticas desfavoráveis. Isso se deve à plasticidade comportamental dos animais em pastejo, os quais possuem habilidade para rapidamente responder às mudanças no ambiente (Zanine et al., 2007; Sejian et al., 2012).

Quando submetidos à condição de desconforto térmico, os animais alteram sua postura, na tentativa de fisicamente se posicionarem para aproveitar correntes de vento e facilitar a dissipação de calor. Ainda, permanecem a maior parte do tempo sem se locomover ou em deslocamento reduzido, na tentativa de diminuir a geração interna de calor (Santos, 2021). Um dos direcionadores do deslocamento de bovinos a pasto é o comportamento de busca por água para dessedentação, ou seja, para saciar a sede. A frequência e o padrão de dessedentação nos bovinos podem apresentar diferenças, de acordo com o sistema de produção adotado e entre as estações do ano. Barreto et al. (2022) demonstraram que o número de visitas ao bebedouro foi sempre maior para os animais mantidos em pastagens não sombreadas comparativamente aos mantidos em ILPF, tanto de manhã quanto de tarde, com variações expressivas também em função das estações climáticas. A maior frequência de idas ao bebedouro está relacionada à necessidade de amenização do estresse calórico. Os resultados desse estudo podem ser observados na Figura 9.8.

Uma das metodologias mais adotadas para avaliação do comportamento de animais de produção é a "*focal-*

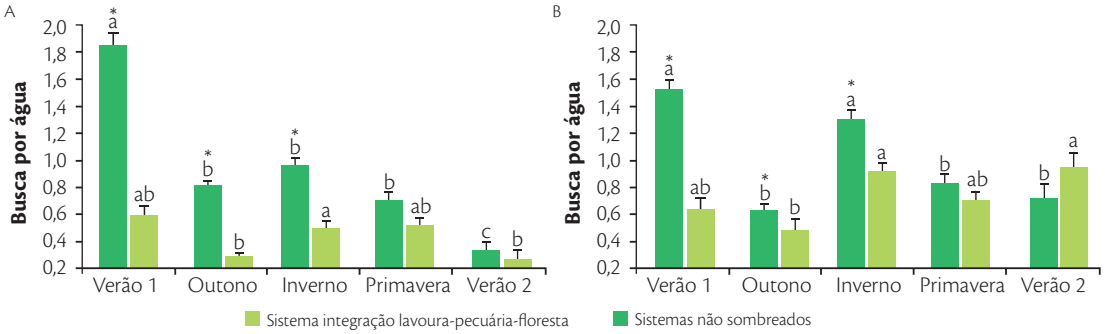


Figura 9.8. Frequência de ida ao bebedouro manifestada por machos bovinos mantidos em pastagens não sombreadas (NS) ou em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), nos turnos da manhã (A) e da tarde (B). (*) indica diferença significativa entre os sistemas na estação; (a, b, c, d) indica diferença significativa entre as estações no tratamento (P < 0,05).

Fonte: Adaptado de Barreto et al. (2022).

-animal sampling", que preconiza a observação instantânea e o registro das ações de um grupo de indivíduos, por um período específico (Altmann, 1974), em intervalos predeterminados. Utilizando essa técnica, Giro et al. (2019) demonstraram haver diferenças no comportamento de bovinos de corte em sistemas integrados de produção com ou sem sombreamento de árvores. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 9.2. Apesar de o tempo de pastejo não ter sido influenciado nesse estudo, animais criados com menor acesso a áreas sombreadas tiveram menor tempo total de ruminação e passaram mais tempo em ócio, comparativamente aos animais criados em ILPF. Isso ocorre porque a ruminação é uma atividade geradora de calor endógeno, decorrente da fermentação ruminal, e os animais sem acesso à sombra necessitam dissipar mais calor ao invés de acumulá-lo. Contudo, a redução da atividade de ruminação está relacionada à menor ingestão de alimentos, bem como à redução na aquisição de energia, requerida para o crescimento do animal e seu ótimo desempenho. Ainda, o estudo apontou que animais com menor conforto térmico passaram mais tempo em ócio, a fim de, também, reduzir a geração de calor endógeno decorrente da ativação muscular necessária para sua movimentação voluntária. Em última instância, mais tempo em ócio se traduz em menor disponibilidade de tempo para o animal realizar as atividades relacionadas à alimentação e à reprodução, com consequentes impactos negativos nos indicadores produtivos.

Diante disso, nota-se que o sistema de produção e o conforto térmico disponibilizado ao animal podem interferir no tempo dedicado ao descanso e à ruminação, bem como no deslocamento dos animais para busca por alimento, frente a condições adversas. Barreto et al. (2022) observaram que os bovinos criados em áreas não sombreadas utilizam o período mais ameno do dia para pastejar, principalmente nos dias mais quentes, pois nos momentos de maior desafio térmico tenderam a passar mais tempo deitados e reduzir seu deslocamento, como forma de diminuir a geração endógena de calor. Com isso, os bovinos criados em pastagens com pouca disponibilidade de sombra natural alteram seu comportamento na busca por alimento, intensificando seu deslocamento à noite e de madrugada, períodos que deveriam ser utilizados para dissipação do calor acumulado ao longo do dia. Na Figura 9.9, pode-se observar o tempo de deslocamento dos animais mantidos em sistema não

Tabela 9.2. Comportamento (minutos/turno) expresso por bovinos de corte mantidos em sistemas de pastagens não sombreadas (NS) ou de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

Atividades	Sistemas		P-valor
	NS	ILPF	
Pastejo	118,1 ± 3,6	121,6 ± 3,4	ns
Ruminação (total)	36,6 ± 2,2^{b}	42,9 ± 2,2^{a}	<0,05
Ruminação em pé	18,4 ± 1,7^{b}	23,8 ± 1,6^{a}	<0,05
Ruminação deitado	18,2 ± 1,8	19,1 ± 1,8	ns
Ócio (total)	65,9 ± 2,8^{a}	57,6 ± 2,7^{b}	<0,05
Ócio em pé	44,4 ± 2,4	46,2 ± 2,3	ns
Ócio deitado	21,5 ± 1,4^{a}	11,4 ± 1,3^{b}	<0,05

Letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa entre sistemas de produção. ^{ns} Não significativo.
Fonte: Adaptado de Giro et al. (2019).

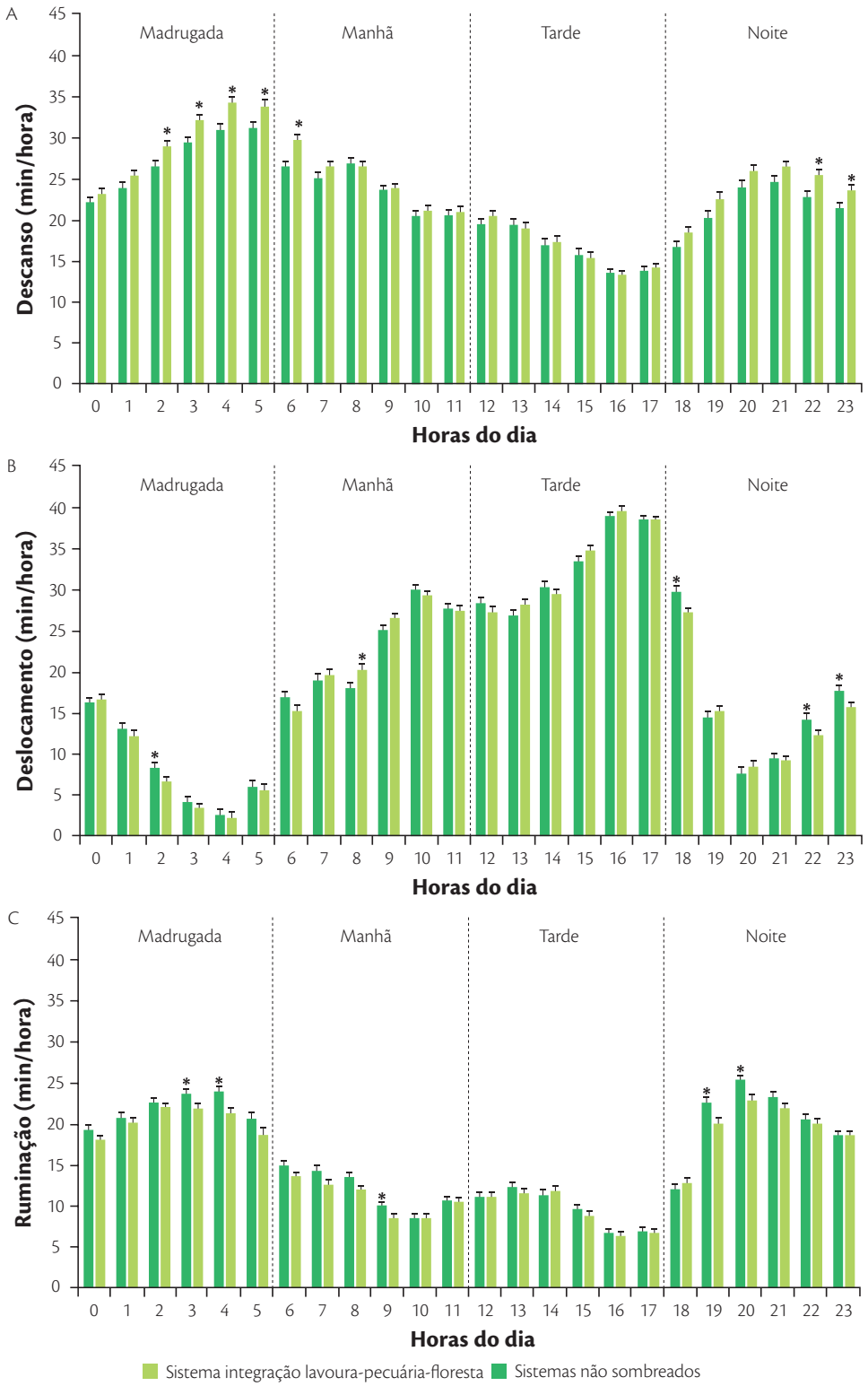


Figura 9.9. Tempo (minutos/hora) dedicado para ócio (A), deslocamento (B) e ruminação (C) por bovinos criados em pastagens não sombreadas (NS) ou em integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), com registros realizados durante doze meses consecutivos por sensores eletrônicos. (*) indica diferença significativa entre sistemas de produção dentro da hora ($P < 0,05$).

Fonte: Adaptado de Barreto et al. (2022).

sombreado ou em ILPF, os quais foram monitorados permanentemente por sistema eletrônico, com uso de acelerômetros acoplados a colares.

A ausência prolongada de comportamentos naturais pode induzir os animais ao sentimento de frustração e à manifestação de comportamentos anômalos, como agressividade, ansiedade e estereotipias (Mason et al., 2007). Comportamentos de estereotipias, automutilação, agressividade excessiva e apatia são caracterizados como ausência de bem-estar (Broom; Molento, 2004) e não foram observados nos estudos realizados nos sistemas de ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste, entre 2014 e 2024. Por isso, há evidências de que, além do conforto térmico, o enriquecimento ambiental proporcionado pelas árvores dentro de um sistema de ILPF seja relevante para conferir maior ambiência aos animais, amenizando ou eliminando a manifestação de comportamentos anômalos ou indesejáveis.

9.2.7 Efeitos do ILPF no desempenho zootécnico

A produtividade dos bovinos em pastagens é relacionada à capacidade do animal de se adaptar às condições ambientais, e nas regiões de clima tropical a tolerância ao calor é um dos aspectos mais importantes. O estresse, caracterizado pela soma de mecanismos de defesa do animal contra um agente estressor, causa perdas significativas nos sistemas de produção. Nos bovinos, o estresse térmico causa a redução do apetite e do consumo de forragem, pois os animais redirecionam sua energia na tentativa de regular a temperatura corporal e manter a homeostase, em vez de utilizar a energia para a digestão e produção. Por isso, o estresse térmico afeta de forma direta e indireta o comportamento e a saúde dos animais (Hansen, 2009), e impacta negativamente na sua produtividade.

Diferentes fatores abióticos podem afetar a produtividade animal, dentre eles temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, movimento do ar e precipitação pluvial. São também relevantes os fatores relacionados ao animal e que modulam sua taxa metabólica, como raça, porte, idade, estágio gestacional e/ou lactacional, e condição de saúde. Alterações em qualquer um desses elementos podem desencadear desbalanceamento eletrolítico, disfunção enzimática e estresse oxidativo, causando redução do desempenho, diminuição da qualidade da carne e até morte (West, 2003). Por isso, a adoção do ILPF advém como uma estratégia interessante de manejo ambiental, que pode mitigar os efeitos negativos do clima tropical ou de ondas de calor.

Uma das perguntas mais frequentes e de maior interesse quando se aborda o uso dos sistemas de ILPF para criação de bovinos de corte é sobre uma eventual diferença no ganho de peso dos animais. Vale ressaltar que comparativamente às áreas de pastagens menos sombreadas e bem manejadas, pode-se imaginar haver uma relação de ganho de peso desfavorável aos animais criados em sistema ILPF. Contudo, como já visto em capítulo anterior, vários estudos indicam que o ganho de peso médio diário dos animais criados em sistemas de ILPF é similar aos sistemas pouco sombreados (Meo-Filho et al., 2022; Pasquini Neto et al., 2025). Em trabalho retrospectivo, Brunetti et al. (2025) analisaram durante três anos consecutivos o ganho de peso diário de animais mantidos em sistemas com e sem arborização, tanto na estação seca quanto chuvosa, em região de clima tropical. Os resultados do estudo podem ser observados na Tabela 9.3.

Importante observar que, em função da presença do componente arbóreo no ILPF, uma maior área de sombreamento diminui também a incidência de radiação fotossinteticamente ativa na pastagem, o que pode reduzir de 5% a 30% a produção de forragem por unidade de área, a depender da época do ano (Brunetti et al., 2025). Por óbvio, isso pode reduzir a capacidade de suporte da área e a lotação animal adotada, em virtude da menor produção e disponibilidade de forragem. Contudo, observando o desem-

Tabela 9.3. Ganho de peso médio (kg/animal/dia) de bovinos criados em sistemas de pastagens não sombreadas (NS) ou em integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ao longo de três safras consecutivas (anos 2020 a 2023).

Safra	Sistemas	Estações		Erro-padrão
		Seca	Chuvosa	
2020/2021	NS	0,115 $^{Ab(B)}$	0,777 $^{Aa(A)}$	0,04
	ILPF	0,140 $^{Ab(B)}$	0,695 $^{Aa(B)}$	0,04
2021/2022	NS	0,219 $^{Ab(B)}$	0,621 $^{Aa(B)}$	0,03
	ILPF	0,319 $^{Ab(A)}$	0,598 $^{Aa(C)}$	0,03
2022/2023	NS	0,396 $^{Ab(A)}$	0,784 $^{Aa(A)}$	0,04
	ILPF	0,301 $^{Ab(A)}$	0,839 $^{Aa(A)}$	0,04

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas para o mesmo ano, letras minúsculas nas linhas, e letras maiúsculas dentro de parênteses para o mesmo sistema e estações não diferem entre si ($P \leq 0,05$).
Fonte: Adaptado de Brunetti et al. (2025).

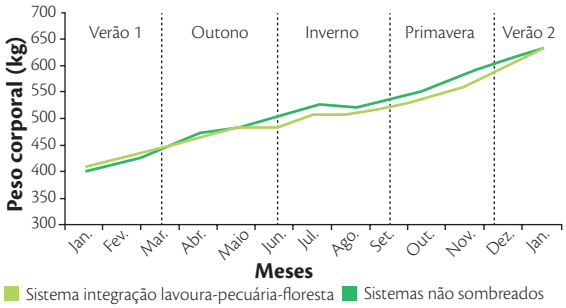


Figura 9.10. Evolução mensal das médias de peso corporal (kg) de machos bovinos mantidos em sistemas de pastagens sem sombreamento (NS) ou em lavoura-pecuária-floresta (ILPF), durante diferentes estações do ano em clima tropical.
Fonte: Romanello et al., 2023.

penho individual dos animais criados em pastagens rotacionadas com ILPF ou em sistemas rotacionados intensivos sem arborização, nota-se que o resultado ao final de um ciclo produtivo de 12 meses é praticamente idêntico. Na Figura 9.10, é possível observar a evolução do peso corporal de machos bovinos não castrados, criados em áreas não sombreadas ou em ILPF em diferentes épocas do ano.

Por fim, é importante ressaltar que bovinos de diferentes raças exibem respostas distintas quando expostos a um ambiente térmico desfavorável. Sob altas temperaturas, os animais zebuínos têm melhor performance em relação aos taurinos, em função de sua maior tolerância ao estresse térmico pelo calor. Dessa forma, a escolha do genótipo a ser criado também é essencial, principalmente em regiões de clima mais quente. O gado zebuíno possui taxas metabólicas mais baixas, pele mais fina e mecanismos mais eficientes de dissipação de calor, o que lhe confere traços que caracterizam maior tolerância ao calor e produtividade frente a condições de estresse térmico (Frisch; Vercoe, 1984; Spiers et al., 1994). Por isso, pode-se inferir que os sistemas de ILPF sejam tão mais positivamente impactantes em termos de ganhos de conforto e bem-estar animal quanto menos adaptados forem os genótipos a serem criados nesses sistemas.

9.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à crescente demanda da sociedade por sistemas mais sustentáveis de produção animal, a utilização de sistemas de integração, como o ILPF, tem se tornado uma importante alternativa para a pecuária em países de clima tropical. De forma geral, os sistemas com arborização melhoram o conforto e bem-estar de bovinos e bubalinos, consequentemente interferindo de forma positiva no seu comportamento, reprodução e desempenho zootécnico. Nesse sentido, a adoção de sistemas integrados de produção se torna uma aliada na promoção de um ambiente adequado para que os animais expressem seu potencial máximo de produção, prezando pela ética e pelo conforto animal, principalmente em regiões tropicais do país.

9.4 REFERÊNCIAS

AHMAD, N.; NOAKES, D. E. Ultrasound imaging in determining the presence of testicular degeneration in two male goats. **The British Veterinary Journal**, v. 151, n. 1, p. 101-110, 1995. DOI: http://doi.org/10.1016/S0007-1935(05)80069-7.

ALVES, F. V. O componente animal em sistemas de produção em integração. In: BUNGENSTAB, D. J. (ed.). **Sistemas de Integração**: a produção sustentável. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012. p. 143-154.

ALVES, M. B.; ARRUDA, R. P.; BATISSACO, L.; FLOREZ-RODRIGUEZ, S. A.; OLIVEIRA, B. M.; TORRES, M. A.; RAVAGNANI, G. M.; LANÇONI, R.; ALMEIDA, T. G.; STORILLO, V. M.; VELLONE, V. S.; FRANCI, C. R.; THOMÉ, H. E.; CANELLA, C. L.; ANDRADE, A. F.; CELEGHINI, E. C. Low-level laser therapy to recovery testicular degeneration in rams: effects on seminal characteristics, scrotal temperature, plasma testosterone concentration, and testes histopathology. **Lasers in Medical Science**, v. 31, n. 4, p. 695-704, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s10103-016-1911-1.

ALTMANN, J. Observational study of behavior: sampling methods. **Behaviour**, v. 49, n. 3, p. 227-267, 1974. DOI: https://doi.org/10.1163/156853974x00534.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Agrarian**, v. 12, n. 43, p. 57-70, 2019. DOI: http://doi.org/10.30612/agrarian.v12i43.8520.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE. **Beef Report 2024**: perfil da pecuária no Brasil. 2024. Disponível em: https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/. Acesso em: 15 ago. 2025.

AVENDANO, R. L.; ALVAREZ, V. F. D.; CORREA, C. A.; SAUCEDO, Q. J. S.; ROBINSON, P. H.; FADEL, J. G. Effect of cooling Holstein cows during the dry period on postpartum performance under heat stress conditions. **Livestock Science**, v. 105, n. 1-3, p. 198-206, 2006. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.06.009.

BAENA, M. M.; COSTA, A. C.; VIEIRA, G. R.; ROCHA, R. F. B.; RIBEIRO, A. R. B.; IBELLI, A. M. G.; MEIRELLES, S. L. C. Heat tolerance responses in a Bos taurus cattle herd raised in a Brazilian climate. **Journal of Thermal Biology**, v. 81, p. 162-169, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.02.017.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais**: conforto animal. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010. 269 p.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. P.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001.

BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D. J. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta**: a produção sustentável. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 11-18.

BARRETO, A. N.; BARIONI JUNIOR, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; PEDROSO, A. F.; MARCONDES, C. R.; JACINTHO, M. A. C.; ROMANELLO, N.; SOUSA, M. A. P.; COSTA, L. N.; GARCIA, A. R. Thermal comfort and behaviour of beef cattle in pasture-based systems monitored by visual observation and electronic device. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 253, p. 105687, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105687.

BARUSELLI, P. S. Sexual behavior in buffaloes. In: WORLD BUFFALO CONGRESS, 4., 1994, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: International Buffalo Federation, 1994. v. 1, p. 158-173.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Silvopastoral system with *Eucalyptus* as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 1, p. e20180425, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Mapa do leite**: políticas públicas e privadas para o leite. Brasília: MAPA, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite. Acesso em: 6 ago. 2025.

BROOM, D. M.; MOLENTO, C. F. M. Animal welfare: concept and related issuesReview. **Archives of Veterinary Science**, v. 9, p. 1-11, 2004. DOI: http://doi.org/10.5380/avs.v9i2.4057.

BRUNETTI, H. B.; PASQUINI NETO, R.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; GARCIA, A. R.; PINHO, L. F.; SOUSA, A. J. C.; RAMOS, G. G.; BERNARDI, A. C. C.; PEDROSO, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Late stages of tropical silvopastoral system: an opportunity to maximise forage and animal production. **Grass and Forage Science**, v. 80, n. 3, p. e70010, 2025. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.70010.

BUFFINGTON, D. E.; COLAZZO-AROCHO, A.; CATON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe humidity comfort index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers**, v. 24, p. 711-714, 1981. DOI: http://doi.org/10.13031/2013.34325.

COLLIER, R. J.; GEBREMEDHIN, K. G. Thermal biology of domestic animals. **Annual Review of Animal Biosciences**, v. 3, n. 1, p. 513-532, 2015. DOI: http://doi.org/10.1146/annurev-animal-022114-110659.

COULTER, G. H.; SENGER, P. L.; BAILEY, R. C. Relationship of scrotal surface temperature measured by infrared thermography to subcutaneous and deep testicular temperature in the ram. **Reproduction (Cambridge, England)**, v. 84, n. 2, p. 417-423, 1988. DOI: http://doi.org/10.1530/jrf.0.0840417.

CUONG, L. X.; TAN, L. V.; DUNG, C. A.; CHUNG, D. P.; LONG, V. N. Study on the effects of season and genotypes on the reproductive performance in crossbred cattle. In: STRENGTHENING RESEARCH ON ANIMAL REPRODUCTION AND DISEASE DIAGNOSIS IN ASIA THROUGH THE APPLICATION OF IMMUNOASSAY TECHNIQUES, 1994, Bangkok. **Proceedings of the Final Research Co-ordination Meeting**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1994. p. 91-99.

DOBSON, H.; TEBBLE, J. E.; SMITH, R. F.; WARD, W. R. Is stress really all that important? **Theriogenology**, v. 55, n. 1, p. 65-73, 2001. DOI: http://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00446-5.

DOMICIANO, L. F.; MOMBACH, M. A.; CARVALHO, P.; SILVA, M. N. F.; PEREIRA, D. H.; CABRAL, L. S.; PEDREIRA, B. C. Performance and behaviour of Nellore steers on integrated systems. **Animal Production Science**, v. 58, n. 5, p. 920-929, 2016. DOI: http://doi.org/10.1071/AN16351.

FERNANDEZ-NOVO, A.; PÉREZ-GARNELO, S. S.; VILLAGRÁ, A.; PÉREZ-VILLALOBOS, N.; ASTIZ, S. The effect of stress on reproduction and reproductive technologies in beef cattle: a review. **Animals**, v. 10, n. 11, p. 2096, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/ani10112096.

FIGUEIREDO, E. B.; JAYASUNDARA, S.; BODORNAL, R. O.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 420-431, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132.

FRISCH, J. E. E.; VERCOE, T. E. An analysis of growth of different cattle genotypes reared in different environments. **Journal of Agricultural Science**, v. 103, n. 1, p. 137-153, 1984. DOI: http://doi.org/10.1017/S0021859600043409.

GARCIA, A. R. **Efeitos do estresse térmico testicular e do uso da somatotropina recombinante bovina nas características seminais, integridade de membranas, função mitocondrial e estrutura da cromatina de espermatozoides de touros Simental (*Bos taurus taurus*)**. 2004. 258 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

GARCIA, A. R. Conforto térmico na reprodução de bubalinos criados em condições tropicais. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 37, p. 121-130, 2013.

GARCIA, A. R. Degeneração testicular: um problema superado ou ainda um dilema? **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 41, n. 1, p. 33-39, 2017.

GARCIA, A. R.; MATOS, L. B.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; NAHÚM, B. S.; ARAÚJO, C. V.; SANTOS, A. X. Variáveis fisiológicas de búfalas leiteiras criadas sob sombreamento em sistemas silvipastoris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1409-1414, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000039.

GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; REDAELLI, V.; LUZI, F.; LAURENT, N.; MENEGAZZO, L. P.; GRUDZINSKI, C. E.; SANTOS JUNIOR, P. C.; BARBOSA, A. V. Use of infrared thermography from a crewed aerial vehicle for remote sensing of tropical pasture areas with different levels of afforestation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 213, p. 108198, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108198.

GAUGHAN, J.; LACETERA, N.; VALTORTA, S. E.; KHALIFA, H. H.; HAHN, L.; MADER, T. Response of domestic animals to climate challenges. In: EBI, K. L.; BURTON, I.; MCGREGOR, G. R. (ed.). **Biometeorology for adaptation to climate variability and change**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 131-170. DOI: http://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3_7.

GIRO, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BARIONI JUNIOR, W.; PEDROSO, A. F.; LEMES, A. P.; BOTTA, D.; ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. **The Science of the Total Environment**, v. 684, p. 587-596, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377.

GONÇALVES, A. A.; GARCIA, A. R.; ROLIM FILHO, S. T.; SILVA, J. A. R.; MELO, D. N.; GUIMARÃES, T. C.; TAVARES, H. R.; SILVA, T. V. G.; SOUZA, E. B.; SANTOS, S. D. S. D.; OHASHI, O. M. Scrotal thermoregulation and sequential sperm abnormalities in buffalo bulls (*Bubalus bubalis*) under short-term heat stress. **Journal of Thermal Biology**, v. 96, p. 102842, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102842.

GONÇALVES, J. D.; GARCIA, A. R.; ARRUDA, R. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; TONATO, F.; SOUSA, A. J. C.; PINHO, L. F.; AMARAL PEREIRA, V. S.; VERGANI, G. B.; OLIVEIRA, M. E. F. Ultrasonographic evaluation of testicular and Pampiniform plexus characteristics in young bulls under different microclimatic conditions in a tropical environment. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 25940, 2025. DOI: http://doi.org/10.1038/s41598-025-05522-y.

HANSEN, P. J. Effects of heat stress on mammalian reproduction. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, v. 364, n. 1534, p. 3341-3350, 2009. DOI: http://doi.org/10.1098/rstb.2009.0131.

JAIN, L. S.; TAILOR, S. P. Effect of atmospheric temperature and humidity on oestrous and conception in Surti buffaloes. **Indian Journal of Dairy Science**, v. 48, p. 18-20, 1995.

JANNES, P.; SPIENSSES, C.; VAN DER AUWERA, I.; D'HOOGHE, T.; VERHOEVEN, G.; VANDERSCHUEREN, D. Male subfertility induced by acute scrotal heating affects embryo quality in normal female mice. **Human Reproduction**, v. 13, n. 2, p. 372-375, 1998. DOI: http://doi.org/10.1093/humrep/13.2.372.

KARVATTE JUNIOR, N.; KLOSOWSKI, E. S.; ALMEIDA, R. G.; MESQUITA, E. E.; OLIVEIRA, C. C.; ALVES, F. V. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, n. 12, p. 1933-1941, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-016-1180-5.

KASTELIC, J. P.; COOK, R. B.; COULTER, G. H. Contribution of the scrotum and testes to scrotal and testicular thermoregulation in bulls and rams. **Reproduction**, v. 108, n. 1, p. 81-85, 1996. DOI: http://doi.org/10.1530/jrf.0.1080081.

KASTELIC, J. P.; COOK, R. B.; COULTER, G. H. Scrotal/testicular thermoregulation and the effects of increased testicular temperature in the bull. Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice, v. 13, n. 2, p. 271-282, 1997. DOI: https://doi.org/10.1016/s0749-0720(15)30340-6.

KASTELIC, J. P.; COOK, R. B.; PIERSON, R. A.; COULTER, G. H. Relationships among scrotal and testicular characteristics, sperm production, and seminal quality in 129 beef bulls. **Canadian Journal of Veterinary Research**, v. 65, p. 111-115, 2001.

LEMES, A. P.; FONTES, P. K.; NOGUEIRA, M. F. G.; WATANABE, T. F.; GARCIA, A. R.; GIMENES, L. U. Environmental conditions can modulate the gene expression of embryo from primiparous beef cows. **Reproduction, Fertility, and Development**, v. 34, n. 2, p. 272-272, 2022. DOI: http://doi.org/10.1071/RDv34n2Ab72.

LOPES, M. L. T.; CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; SANTOS, A. S.; AGUINAGA, A. A. Q.; FLORES, J. P. C.; MORAES, A. Sistema de integração lavoura-pecuária: efeito do manejo da altura em pastagem de aveia preta e azevém anual sobre o rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1499-1506, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000096.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022.

MARAI, I. F. M.; HABEEB, A. A. M.; GAD, A. E. Rabbits' productive, reproductive and physiological performance traits as affected by heat stress: a review. **Livestock production science**, v. 78, n. 2, p. 71-90, 2002.

MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; SILVA, S. L.; TITTO, E. A. L. Respostas fisiológicas e produtivas de vacas holandesas em lactação submetidas a diferentes ambientes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 1, p. 181-191, 2004. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982004000100022.

MASON, G.; CLUBB, R.; LATHAM, N.; VICKERY, S. Why and how should we use environmental enrichment to tackle stereotypic behaviour. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 102, n. 3-4, p. 163-188, 2007. DOI: http://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.05.041.

MATO GROSSO DO SUL. Agência Estadual de Defesa Sanitária Animal e Vegetal. **Nota técnica sobre casos de mortalidade de bovinos em MS**. Campo Grande: IAGRO, 2023. Disponível em https://www.iagro.ms.gov.br/nota-tecnica-iagro-e-semadesc-sobre-casos-de-mortalidade-de-bovinos-em-ms/. Acesso em: 13 ago. 2025.

MELLADO, M.; LÓPEZ, R.; SANTIAGO, Á.; VELIZ, F. G.; MACÍAS-CRUZ, U.; AVENDAÑO-REYES, L.; GARCÍA, J. E. Climatic conditions, twining and frequency of milking as factors affecting the risk of fetal losses in high-yielding Holstein cows in a hot environment. **Tropical Animal Health and Production**, v. 48, n. 6, p. 1247-1252, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s11250-016-1084-8.

MENEGASSI, S. R. O.; BARCELLOS, J. O. J.; DIAS, E. A.; KOETZ JUNIOR, J. R. C.; PEREIRA, G. R.; PERIPOLLI, V.; MCMANUS, C.; CANOZZI, M. E. A.; LOPES, F. G. Scrotal infrared digital thermography as a predictor of seasonal effects on sperm traits in Braford bulls. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 3, p. 357-364, 2015. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-014-0847-z.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest Biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

MORAES, A.; CARVALHO, F. P. C.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C. A.; COSTA, S. E. V. G.; KUNRATH, T. R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004.

MORAES, M. J.; CASTILHO, E. F.; BALIEIRO, J. C. C.; BERNARDI, A. C. C.; BARRETO, A. N.; PINHO, L. F.; RAMOS, G. G.; AZEVEDO, G. N.; ZANETTI, L. K.; GARCIA, A. R. Differences in the behavioral parameters of young Zebu and composite bulls kept on non-forested or in integrated crop-livestock-forestry systems. **Animals**, v. 14, n. 6, p. 944, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/ani14060944.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, F. A.; SILVA, G. V.; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; PERNA JUNIOR, F.; BERNDT, A.; MEDEIROS, S. R.; PEDROSO, A. F.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. Performance and feed intake of Nellore steers in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Livestock Science**, v. 294, p. 105667, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2025.105667.

PEREIRA, M. A.; BUNGENSTAB, D. J.; EUCLIDES, V. P. B.; MALAFAIA, G. C.; BISCOLA, P. H. N.; MENEZES, G. R. O.; ABREU, U. G. P.; LAURA, V. A.; NOGUEIRA, É.; MAURO, R. A.; SILVA, M. P.; NICACIO, A. C.; ALMEIDA, R. G.; GOMES, R. C.; SILVA, J. C. B.; SOUZA, V. F. From traditionally extensive to sustainably intensive: a review on the path to a sustainable and inclusive beef farming in Brazil. **Animals**, v. 14, n. 16, p. 2340, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/ani14162340.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015.

RENAUDEAU, D.; NOBLET, J.; DOURMAD, J. Y. Effect of ambient temperature on mammary gland metabolism in lactating sows. **Journal of Animal Science**, v. 81, n. 1, p. 217-231, 2003. DOI: http://doi.org/10.2527/2003.811217x.

ROMANELLO, N.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; BARIONI JUNIOR, W.; BRANDÃO, F. Z.; MARCONDES, C. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; PANTOJA, M. H. A.; BOTTA, D.; GIRO, A.; MOURA, A. B. B.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Thermoregulatory responses and reproductive traits in composite beef bulls raised in a tropical climate. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 9, p. 1575-1586, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-018-1557-8.

ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; SOUSA, M. A. P.; BALIEIRO, J. C. C.; BRANDÃO, F. Z.; TONADO, F.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORTUGAL, J. A. B.; GARCIA, A. R. Thermal comfort of Nelore (*Bos indicus*) and Canchim (*Bos taurus* × *Bos indicus*) bulls kept in an integrated crop-livestock-forestry system in a tropical climate. **Agricultural Systems**, v. 209, p. 103687, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103687.

ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; BALIEIRO, J. C. C.; BRANDÃO, F. Z.; ANDRADE, A. F. C.; ZAPPATERRA, M.; GARCIA, A. R. Effect of access to natural shade on scrotal thermoregulatory capacity, integrity of the testicular parenchyma and sperm morphology of Nelore (*Bos indicus*) and Canchim (*Bos taurus* x *Bos indicus*) bulls. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 11, p. 2431-2446, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-024-02759-6.

SANTOS, F. L. **Comportamento e termorregulação de bovinos de corte sob diferentes condições ambientais**. 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Pirassununga.

SCHÜTZ, K. E.; ROGERS, A. R.; POULOUIN, Y. A.; COX, N. R.; TUCKER, C. B. The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 93, n. 1, p. 125-133, 2010. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2009-2416.

SCHÜTZ, K. E.; ROGERS, A. R.; COX, N. R.; WEBSTER, J. R.; TUCKER, C. B. Dairy cattle prefer shade over sprinklers: Effects on behavior and physiology. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 1, p. 273-283, 2011. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2010-3608.

SEJIAN, V.; MAURYA, V. P.; NAQVI, S. M. K. Effect of walking stress on growth, physiological adaptability and endocrine responses in Malpura ewes in a semi-arid tropical environment. **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 2, p. 243-252, 2012. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-011-0420-y.

SHAHAT, A.; CASTILLO, J.; THUNDATHIL, J.; KASTELIC, J. Angus bulls voluntarily access shade during hot weather, reducing scrotal subcutaneous temperatures and improving sperm quality. **Canadian Journal of Veterinary Research**, v. 87, p. 17-22, 2023.

SILVA, R. G. **Introdução à bioclimatologia animal**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 2000. 285 p.

SILVA, J. A. R.; ARAÚJO, A. A.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; SANTOS, N. F. A.; VIANA, R. B.; GARCIA, A. R.; RONDINA, D.; GRISE, M. M. Hormonal changes in female buffaloes under shading in tropical climate of Eastern Amazon, Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 43, n. 1, p. 44-48, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982014000100007.

SILVA, L. K. X.; BARROS, D. V.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; SILVA, A. O. A.; SOUSA, J. S.; FATURI, C.; PANTOJA, M. H. A.; BOTTA, D.; GARCIA, A. R. Temperaturas de superfície escrotal avaliadas por termografia de infravermelho e qualidade seminal de touros bubalinos em condições de clima tropical úmido. Anais da 2ª Reunião da Associação Brasileira de Andrologia Animal (ABRAA). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 12, p. 875-882, 2017.

SILVA, W. C.; SILVA, J. A. R.; MARTORANO, L. G.; SILVA, É. B. R.; BELO, T. S.; NEVES, K. A. L.; CAMARGO JÚNIOR, R. N. C.; ARAÚJO, C. V.; VILELA, L. G. P.; JOAQUIM, L. A.; RODRIGUES, T. C. G. C.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B. Characterization of the temperament and reactivity of Nelore cattle (*Bos indicus*) associated with behavior scores during corral management in the humid tropics. **Animals**, v. 14, n. 12, p. 1769, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/ani14121769.

SKINNER, J. D.; LOUW, G. N. Heat stress and spermatogenesis in Bos indicus and Bos taurus cattle. **Journal of Applied Physiology**, v. 21, n. 6, p. 1784-1790, 1966. DOI: http://doi.org/10.1152/jappl.1966.21.6.1784.

SOREN, N. M. Nutritional manipulations to optimize productivity during environmental stresses in livestock. In: SEJIAN, V.; NAQVI, S.; EZEJI, T.; LAKRITZ, J.; LAL, R. (ed.). **Environmental stress and amelioration in livestock production**. Berlin: Springer, 2012. p. 181-218. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-29205-7_8.

SOUSA, A. J. C. **Relações entre características produtivas e etológicas de touros jovens das raças Nelore e Canchim criados em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)**. 2025. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém.

SOUZA, C. F.; TINÔCO, I. F. F.; BAÊTA, F. C.; FERREIRA, W. P. M.; SILVA, R. Avaliação de materiais alternativos para confecção do termômetro de globo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 26, p. 157-164, 2002.

SPIERS, D. E.; VOGT, D. W.; JOHNSON, H. D.; GARNER, G. B.; MURPHY, C. N. Heat-stress responses of temperate and tropical breeds of *Bos taurus* cattle. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**, v. 2, p. 41-52, 1994.

TITTO, C. G.; TITTO, E. A. L.; TITTO, R. M.; MOURÃO, G. B. Heat tolerance and the effects of shade on the behaviour of Simmental bulls on pasture. **Animal Science Journal**, v. 82, n. 4, p. 591-600, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2011.00872.x.

WAITES, G. M. H. Temperature regulation and the testis. In: JOHNSON, A. D.; GOMES, W. R.; VANDERMARK, N. L. (ed.). **The Testis**. Nova Iorque: Academic Press, 1970. p. 241-279. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-0-12-386601-1.50010-X.

WEST, J. W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 86, n. 6, p. 2131-2144, 2003. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X.

ZANINE, A. M.; SANTOS, E. M.; PARENTE, H. N.; FERREIRA, D. J.; OLIVEIRA, J. S.; LANA, R. P.; MACEDO JÚNIOR, G. L. Habito de pastejo de novilhas em pastagens do gênero Brachiaria. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 29, n. 4, p. 365-369, 2007. DOI: http://doi.org/10.4025/actascianimsci.v29i4.992.

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLÈRE, D.; HAVLÍK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M. A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **The Science of the Total Environment**, v. 740, p. 139384, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139384.

Capítulo 10

Biodiversidade de Artrópodes e Serviços Ambientais

Marcos Rafael Gusmão, José Ricardo Macedo Pezzopane, Márcia Cristina de Sena Oliveira, Maria Luiza Franceschi Nicodemo, Carolina Reigada, Matheus Alves de Siqueira, Angélica Maria Penteado Martins Dias



RESUMO: A partir da instalação de sistemas de integração lavoura, pecuária e floresta (ILPF) na Embrapa Pecuária Sudeste, na última década realizaram-se pesquisas visando avaliar o efeito da integração ILPF na biodiversidade de artrópode e consequente promoção de serviços ambientais de regulação e suporte nesses ambientes. Para efeito de análise, os estudos realizados nos sistemas ILPF foram comparados ao sistema convencional de pastagem, sem o componente florestal (SCP). Os estudos conduzidos foram a avaliação da riqueza de insetos associados aos bolos fecais de bovinos criados em sistemas de produção pecuária silvipastoril (SSP) e convencional; o estudo de infestação por ectoparasitas e endoparasitas em bovinos criados em sistema silvipastoril em comparação ao sistema convencional de pastagens; a avaliação do serviço ambiental do besouro coprófago Digitonthophagus gazella na produção de forragem de Urochloa brizantha cv. BRS Piatã e a avaliação do serviço ambiental de controle biológico de lepidópteras associadas ao Croton floribundos por himenópteras parasitoides no sistema silvipastoril. Por meio desses estudos verificou-se que os sistemas ILPF apresentam benefícios variáveis, mas consistentes, de vários processos ecológicos controlados pelo microclima e diversidade de invertebrados, sobretudo insetos associados ao bolo fecal e às espécies florestais. Sugerindo que a conversão de pastagens convencionais em integração com pastagem e espécies florestais nativas ou exóticas contribui para o desenvolvimento de uma pecuária sustentável.
Palavras-chave: Ecologia; Artrópodes; Serviço Ambiental; Diversidade Funcional, Controle Biológico.

ABSTRACT: Since the implementation of integrated crop-livestock-forestry (ICLF) systems at Embrapa Pecuária Sudeste, research has been conducted over the last decade to evaluate the effect of ICLF integration on arthropod biodiversity and the consequent promotion of regulatory and supportive environmental services in these

https://doi.org/10.4322/9786586819427-10

environments. For analysis purposes, studies conducted in ICLF systems were compared to conventional pasture systems without the forestry component (FC). The studies conducted included: evaluating the richness of insects associated with the fecal boluses of cattle raised in silvopastoral (SPS) and conventional livestock production systems; studying ectoparasite and endoparasite infestation in cattle raised in silvopastoral systems compared to conventional pasture systems; and evaluating the environmental service of the dung beetle Digitonthophagus gazella in the forage production of Urochloa brizantha cv. This study investigated the role of BRS Piatã and the environmental service of biological control of lepidopteran pests associated with Croton floribundus by parasitoid hymenoptera in a silvopastoral system. These studies showed that ICLFS provide variable yet consistent benefits from various ecological processes, including those controlled by microclimate and invertebrate diversity, especially insects associated with fecal matter and forest species. Suggesting that converting conventional pastures into integrated pastures with native or exotic forest species contributes to the development of sustainable livestock farming.
Keywords: Ecology; Arthropods; Environmental Service; Functional Diversity; Biological Control.

10.1 INTRODUÇÃO

As relações entre organismos de comunidades locais, e dispersas, contribuem para o funcionamento do ecossistema. Segundo Tilman (2001), os organismos de cada espécie têm um valor que influencia o funcionamento do ecossistema, o qual compreende a diversidade funcional. Os organismos são considerados na diversidade funcional como entidades dinâmicas que interagem com seu ambiente (Calow, 1987). Inicialmente, os estudos de diversidade funcional foram conduzidos para entender como as espécies influenciam o funcionamento do ecossistema e como as espécies respondem às mudanças ambientais. Posteriormente, a abordagem funcional foi expandida para estudos envolvendo estratégias de organismos diante de condições abióticas severas, competição interespecífica e conservação da biodiversidade (Laureto et al., 2015).

Os benefícios ao homem oferecidos pelos ecossistemas compreendem serviços ambientais, os quais podem ser classificados em serviços de provisão, como produção de alimentos, fibras, energia e água doce; e os serviços de regulação e suporte, necessários para a produção de outros serviços (*ver* Capítulo 14). Compreendem exemplos de serviços ambientais de suporte: a manutenção da qualidade do ar e controle da poluição; o controle da temperatura e do regime de chuvas; a regulação do fluxo de águas superficiais e controle das enchentes; a formação e manutenção do solo e da fertilidade do solo; a degradação de dejetos industriais e agrícolas e ciclagem de nutrientes; a redução da incidência de pragas e doenças pelo controle biológico ou equilíbrio de populações; a polinização de plantas agrícolas e silvestres. Esses serviços são, em sua maioria, mediados pela atividade biológica, que depende assim da manutenção da biodiversidade (Nicodemo; Primavesi, 2019; Haines-Young, 2023).

Os sistemas silvipastoris (SSP), dentre estes os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), são tecnologias importantes para restaurar a biodiversidade nos agroecossistemas. A diversidade funcional, compreendendo os insetos, pode gerar benefícios como o controle de ectoparasitas de bovinos por himenópteras parasitoides (Gusmão et al., 2015; Nicodemo et al., 2015); o favorecimento da ciclagem de matéria orgânica, sequestro de carbono e infiltração de água no solo por besouros rola-bosta (Brown et al., 2010); além de vários outros serviços ecossistêmicos, como a polinização. Franco et al. (2020) verificaram que, mesmo nos primeiros anos de instalação de sistemas de integração ILPF, as atividades enzimáticas do solo, como fosfatase ácida, β-glicosidase e uréase, são sensíveis em mostrar efeitos positivos decorrentes da diversidade funcional nos sistemas de integração de plantas e animais. Perez-Alvarez[1], em estudo de meta-análise sobre sistema silvipastoril (SSP), obteve resultados que apoiam o potencial de conservação desses sistemas, proporcionando benefícios para a biodiversidade em nível de propriedade rural. Além disso, o estudo também demonstrou que o potencial dos SSP para apoiar a biodiversidade varia amplamente depen-

[1] PEREZ-ALVAREZ, R.; SNYDER, L. D.; BONATTI, M.; SIEBER, S.; MARTIN, E. A. Global meta-analysis reveals overall benefits of silvopastoral systems for biodiversity. bioRxiv, p. 1-22, 2023. No prelo. DOI: http://doi.org/10.1101/2023.07.30.551160.

dendo de vários fatores relacionados ao histórico de uso da terra, região geográfica e condições climáticas. Embora os SSP representem benefícios para a biodiversidade em comparação com pastagens convencionais, sem árvores (SCP), em particular, para plantas e invertebrados, os *taxa* mais móveis e dependentes da paisagem se beneficiam menos. Por essa razão, a manutenção da biodiversidade de *taxa* como aves e mamíferos requer a combinação de SSP e áreas protegidas como componentes complementares de uma paisagem multifuncional, como exemplo, os corredores ecológicos, fundamentais para minimizar a perda de biodiversidade em paisagens com atividade pecuária.

A integração de culturas agrícolas, pastagens, silvicultura e produção pecuária promovem relações simbióticas nos ecossistemas, levando assim a interações e impactos bidirecionais. Esses impactos podem ser positivos, como culturas agrícolas fornecendo habitats para a fauna invertebrada e microflora associadas à rizosfera e parte aérea das plantas; florestas favorecendo a infiltração de água no solo e regulando o microclima; os excrementos animais servindo como importante fonte de nutrientes, facilitando a dispersão de sementes e mantendo a fertilidade do solo nas áreas de pastagens (Flórez et al., 2023).

A seguir, serão apresentados resultados de pesquisas realizadas em sistemas silvipastoris, que corroboram a teoria de serviços ambientais de regulação e suporte associada ao aumento de biodiversidade.

10.2 BIODIVERSIDADE EM SISTEMAS SILVIPASTORIS E OS SERVIÇOS AMBIENTAIS

10.2.1 Riqueza de insetos associados aos bolos fecais de bovinos criados em sistemas de produção pecuária silvipastoril (SSP) e convencional (SCP)

A relação entre pastagem, árvores, microclima, bovinos e a diversidade de invertebrados presentes nos sistemas silvipastoris (SSP) é pouco estudada. Em experimentação por dois anos em São Carlos-SP, Gusmão et al. (2020) caracterizaram a macrofauna e determinaram a riqueza de invertebrados associados aos bolos fecais de bovinos criados em sistemas SSP e SCP.

As alterações ambientais promovidas pela presença de árvores no SSP, notadamente as reduções da radiação solar (Figura 10.1) e da velocidade dos ventos (Figura 10.2), atenuaram as variações de temperatura do ar e do solo, o que permitiu um microclima favorável à manutenção do teor de umidade do bolo fecal, nicho alimentar para invertebrados coprófagos, e consequente aumento da diversidade da fauna associada às fezes bovinas.

Os índices médios de diversidade (H') para os sistemas SSP e SCP foram de 1,9 e 1,3, respectivamente. Os números de morfoespécies equivalente (SH'), considerando a diversidade H' de cada sistema, foram de seis morfoespécies no SSP e quatro morfoespécies no SCP (Tabela 10.1). Esses valores representam a quantidade de morfoespécies que seriam esperadas em cada

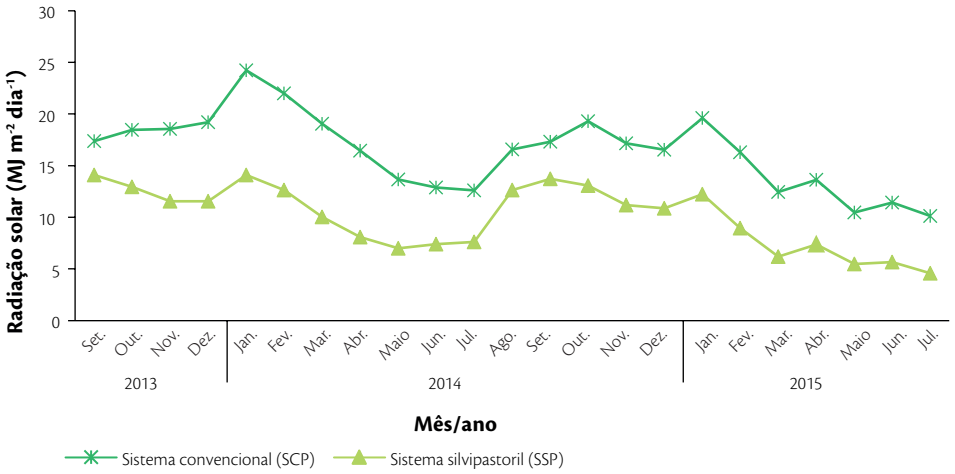


Figura 10.1. Médias da radiação solar medidas nos sistemas silvipastoril (SSP) e convencional de pastagem (SCP) durante o período experimental.

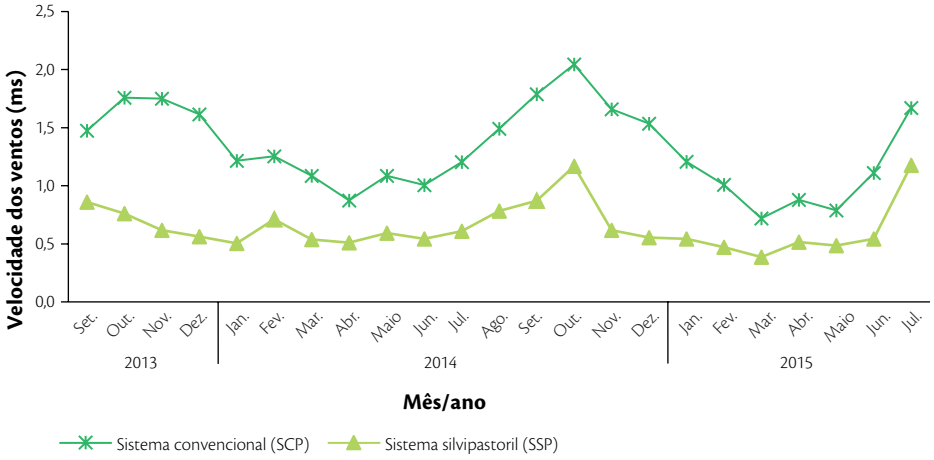


Figura 10.2. Médias da velocidade dos ventos medidas no SSP e SCP durante o período experimental.

Tabela 10.1. Diversidade da fauna de invertebrados associada aos bolos fecais de bovinos mantidos em pastagens de sistemas silvipastoril (SSP) e convencional (SCP) nas estações de primavera de 2014 a verão e inverno de 2025. São Carlos-SP.

Estação/ano	Diversidade (H')*		Nº equivalente de morfoespécie (SH')	
	SSP	SCP	SSP	SCP
Primavera 2014	2,3	2,1	9	8
Verão 2015	1,4	0,5	4	2
Inverno 2015	2,0	1,4	7	4
Média	1,9	1,3	6	4

*H': índice de Shannon; SSP: sistema silvipastoril (SSP); sistema convencional de pastagem (SCP).

Tabela 10.2. Riqueza e abundância da fauna de invertebrados associada a bolos fecais de bovinos criados no sistema silvipastoril (SSP) e sistema de pastagem convencional (SCP) na primavera de 2014 e verão e inverno de 2015. São Carlos-SP.

Sistema	Estação/ano	Riqueza	Abundância
SSP	Primavera 2014	38	1.899
	Verão 2015	33	3.528
	Outono 2015	27	2.525
	Total	98	7.952
SCP	Primavera 2014	31	987
	Verão 2015	23	20.712
	Outono 2015	18	3.111
	Total	72	24.810

SSP: sistema silvipastoril (SSP); sistema convencional de pastagem (SCP).

sistema, se todas as morfoespécies tivessem abundância semelhante (equitabilidade máxima).

Os valores de riqueza de invertebrados (número de morfoespécies) entre os sistemas SSP e SCP nos períodos sazonais foram de 38 e 31 morfoespécies na primavera, 33 e 23 morfoespécies no verão, e 27 e 18 morfoespécies no inverno, respectivamente (Tabela 10.2). No sistema SSP, foi registrada a maior riqueza total (98) em relação ao sistema SCP (72). No entanto, a abundância de invertebrados no SCP (24.810) foi maior do que no SSP (7.952) (Tabela 10.2).

A grande ocorrência de uma morfoespécie de Diptera: Stratiomyidae (6.515 indivíduos), com abundância relativa de (0,4964), contribuiu para a maior abundância de invertebrados no sistema SCP (Tabela 10.3). Indivíduos dessa morfoespécie de Stratiomyidae foram também mais abundantes no SSP, com 0,3471. Em geral, as larvas de Stratiomyidae são eficazes na redução de nutrientes e na modificação da umidade contida no esterco, devido ao seu comportamento alimentar através da decomposição da matéria orgânica (Ferrari et al., 2009). Por outro lado, no sistema SSP foram registrados 58,82% das morfoespécies de invertebrados com abundância relativa maior do que no sistema SCP (Tabela 10.3). Os principais grupos taxonômicos compreenderam três morfoespécies carnívora/detritívora de Coleoptera: Staphylinidae (abundância relativa de 0,1354 para a morfoespécie nº 2; 0,2831 para a morfoespécie nº 3 e 0,0166 para a morfoespécie nº 4), e uma morfoespécie carnívora de Hymenoptera (*Solenopsis* sp.) com abundância relativa de 0,0457 (Tabela 10.3).

Tabela 10.3. Número médio e abundância relativa de invertebrados associados a bolos fecais de bovino criados no sistema silvipastoril (SSP) e sistema de pastagem convencional (SCP) durante a primavera de 2014 e verão e inverno de 2015.

Classe ou Ordem	Ordem ou Família	Morfoespécie	Número médio (abundância relativa)	
			SSP	SCP
Arachnida	Acari	1	7,33 (0,0039)	0,00 (0,00)
Arachnida	Acari	2	26,00 (0,0105)	4,33 (0,0010)
Arachnida	Araneae	1	3,33 (0,0015)	1,00 (0,0007)
Blatodea	Blatidae	1	0,00 (0,00)	0,33 (0,0003)
Chilopoda	Scolopendromorpha	1	3,33 (0,0015)	1,33 (0,0014)
Chilopoda	Scolopendromorpha	2	11,33 (0,0043)	1,00 (0,0003)
Clitellata	Haplotaxida	1	3,33 (0,0015)	1,33 (0,0001)
Coleoptera	Anthicidae	1	0,67 (0,0003)	0,00 (0,00)
Coleoptera	Anthicidae	2	4,33 (0,0019)	1,67 (0,0005)
Coleoptera	Anthicidae	3	0,33 (0,0002)	0,33 (0,0003)
Coleoptera	Anthicidae	4	5,00 (0,0017)	6,67 (0,0021)
Coleoptera	Anthicidae	5	0,67 (0,0002)	0,33 (0,0003)
Coleoptera	Carabidae	1	0,33 (0,0002)	0,00 (0,00)
Coleoptera	Histeridae	1	11,00 (0,0042)	19,00 (0,0037)
Coleoptera	Histeridae	2	1,00 (0,0004)	0,00 (0,00)
Coleoptera	Histeridae	3	15,67 (0,0063)	1,67 (0,0010)
Coleoptera	Histeridae	4	1,00 (0,0004)	1,00 (0,0004)
Coleoptera	Histeridae	5	23,67 (0,0096)	83,67 (0,0339)
Coleoptera	Scarabaeidae	1	0,67 (0,0003)	1,67 (0,0014)
Coleoptera	Scarabaeidae	2	6,67 (0,0034)	2,33 (0,0019)
Coleoptera	Scarabaeidae	3	2,67 (0,0009)	11,00 (0,0034)
Coleoptera	Staphylinidae	1	0,00 (0,00)	4,00 (0,0041)
Coleoptera	Staphylinidae	2	339,67 (0,1354)	499,67 (0,1077)
Coleoptera	Staphylinidae	3	747,00 (0,2831)	784,67 (0,2094)
Coleoptera	Staphylinidae	4	41,33 (0,0166)	65,00 (0,0121)
Dermaptera	Labiduridae	1	17,33 (0,0087)	2,33 (0,0011)
Diptera	Calliphoridae	1	0,67 (0,0002)	15,67 (0,0008)
Diptera	Calliphoridae	1	0,00 (0,00)	1,67 (0,0017)
Diptera	Chironomidae	1	36,00 (0,0143)	32,00 (0,0142)
Diptera	Chironomidae	2	34,33 (0,0137)	0,33 (0,0001)
Diptera	Muscidae	1	15,67 (0,0048)	8,33 (0,0015)
Diptera	Phoridae	1	24,33 (0,0089)	77,67 (0,0240)
Diptera	Sarcophagidae	1	1,00 (0,0004)	0,00 (0,00)
Diptera	Stratiomyidae	1	8,33 (0,0026)	59,67 (0,0347)
Diptera	Stratiomyidae	2	1.010,00 (0.3471)	6.515,00 (0.4964)
Diptera	Tipulidae	1	0,00 (0,00)	3,33 (0,0034)
Hemiptera	Anthocoridae	1	20,00 (0,0078)	11,00 (0,0023)
Hemiptera	Miridae	1	4,67 (0,0018)	6,67 (0,0026)
Hymenoptera	Encyrtidae	1	2,33 (0,0012)	4,00 (0,0041)

Traço (–): informação não aplicável. SSP: sistema silvipastoril (SSP); sistema convencional de pastagem (SCP).

Tabela 10.3. Continuação...

Classe ou Ordem	Ordem ou Família	Morfoespécie	Número médio (abundância relativa)	
			SSP	SCP
Hymenoptera	Formicidae	1	17,67 (0,0085)	2,67 (0,0024)
Hymenoptera	Formicidae	2	5,33 (0,0023)	15,00 (0,0065)
Hymenoptera	Formicidae	3	34,33 (0,0145)	17,00 (0,0137)
Hymenoptera	Formicidae	4	0,00 (0,00)	2,00 (0,0020)
Hymenoptera	*Solenopsis*	1	105,00 (0,0457)	0,00 (0,00)
Isoptera	Termitidae	1	24,33 (0,0119)	1,67 (0,0017)
Lepidoptera	–	1	1,33 (0,0005)	1,00 (0,00005)
Malacostraca	Isopoda	1	32,33 (0,0167)	0,00 (0,00)
Orthoptera	Acrididae	1	0,00 (0,00)	0,67 (0,0007)
Orthoptera	Gryllidae	1	0,33 (0,0002)	0,00 (0,00)
Orthoptera	Gryllidae	2	0,00 (0,00)	0,33 (0,0003)
Scorpiones	Buthidae	1	0,33 (0,0001)	0,00 (0,00)

Traço (–): informação não aplicável. SSP: sistema silvipastoril (SSP); sistema convencional de pastagem (SCP).

Os resultados permitiram concluir que os sistemas integrados de pastagens com árvores são uma ferramenta importante para o aumento da biodiversidade, principalmente os insetos benéficos que vivem associados às fezes bovinas, o que pode contribuir para a redução das infestações por ectoparasitas em bovinos.

10.2.2 Infestação por ectoparasitas e endoparasitas em bovinos criados em sistema silvipastoril (SSP) em comparação ao sistema convencional de pastagens (SCP)

Avaliou-se o nível de infestação pelos principais ectoparasitas em bovinos criados em SSP em comparação ao sistema de pastagem convencional, solteira (SCP), em função das variações de microclima e da diversidade da macrofauna de invertebrados associada ao bolo fecal dos animais. As alterações ambientais promovidas pela presença de árvores no SSP, notadamente a redução da radiação solar, a redução da velocidade dos ventos e o aumento da riqueza da fauna associada às fezes bovinas, influenciaram, em parte, na ocorrência de ectoparasitas (Oliveira et al., 2017a) e endoparasitas (Oliveira et al., 2017b) nos bovinos criados nesses sistemas.

10.2.2.1 Ectoparasitas

Com relação às contagens de moscas-dos-chifres nos animais (Figura 10.3), foram encontradas diferenças significativas entre os dois sistemas ($p < 0,05$), e as menores médias foram observadas no SSP (0,76±0,05), enquanto no SCP foi de 0,97±0,06. Foram verificadas diferenças significativas também para os efeitos de época das colheitas de moscas-dos-chifres e da interação sistema x colheita ($p < 0,05$). Verificaram-se diferenças significativas ($p < 0,05$) nas contagens de insetos entre os dois sistemas nas colheitas de outubro e dezembro de 2013, novembro de 2014 e junho de 2015.

A contagem de carrapatos não mostrou diferença significativa entre os sistemas. As médias transformadas e os respectivos erros-padrão para o SCP foram de 0,86±0,05, e para o SSP de 0,83±0,04. Houve interação entre o tipo de sistema e época das colheitas de carrapatos ($p < 0,05$), e as médias das colheitas apresentaram variações ao longo do período experimental (Figura 10.4). Diferenças significativas foram observadas especificamente nas colheitas de setembro e dezembro/2013, julho, agosto e novembro de 2014 e março/2015.

Não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as médias do número de larvas de *D. hominis* nos animais dos dois sistemas, e para o SCP foi de 0,26±0,04 e SSP de 0,31±0,04. Com relação às colheitas de larvas nos animais, diferenças foram verificadas ($p < 0,05$) em outubro de 2013 e abril de 2014, apresentando contagens maiores para SSP (Figura 10.5). No ano de 2015, houve uma tendência

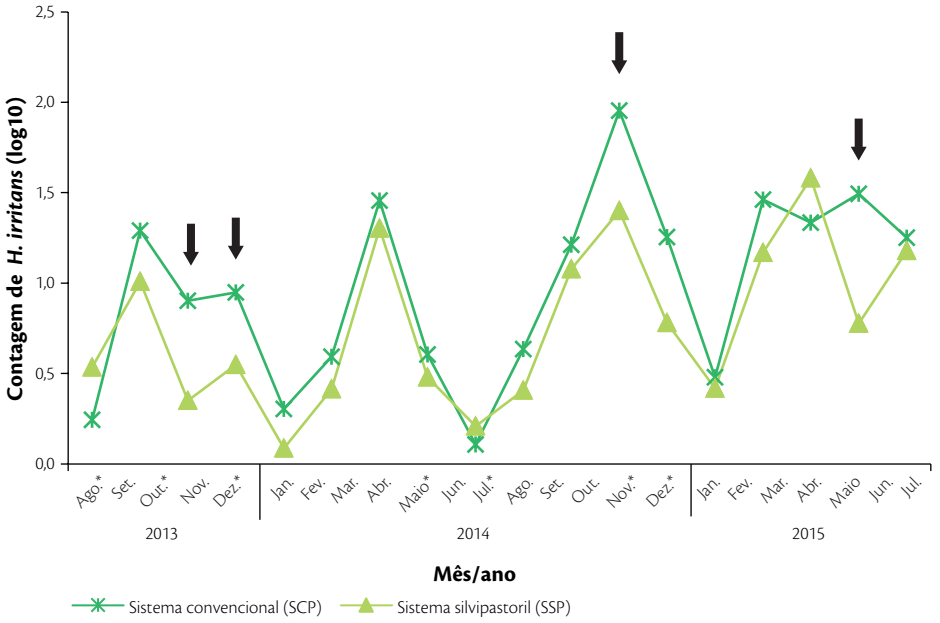


Figura 10.3. Médias das contagens de *Haematobia irritans* por colheita em bovino, ao longo dos meses/ano nos sistemas de pastagem convencional (SCP) e silvipastoril (SSP).

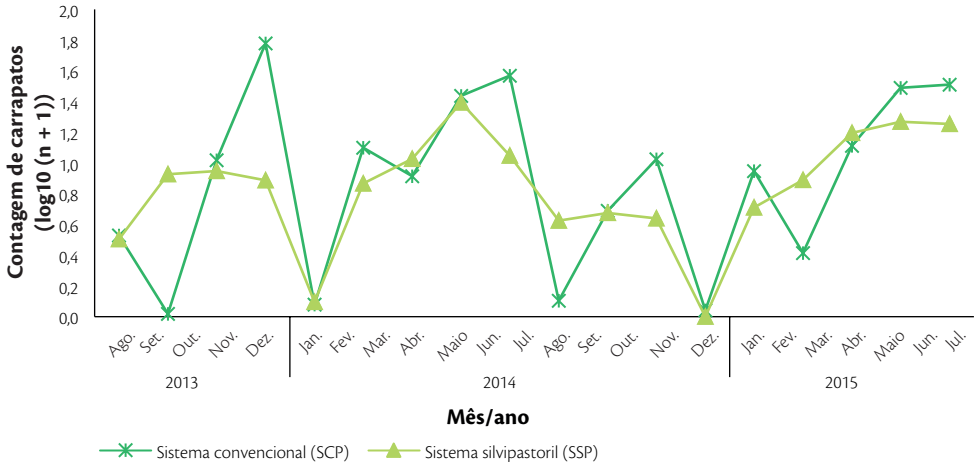


Figura 10.4. Médias das contagens de *R. microplus* em bovinos Canchim, ao longo dos meses/anos das colheitas de acordo com o sistema de produção.

de ambos os sistemas mostrarem níveis mais próximos de infestação, com exceção de junho/2015.

10.2.2.2 Endoparasitas

As contagens de nematódeos de vida livre (NVL) nas pastagens mostraram efeito significativo ($p < 0,05$) para o tipo de sistema, época da colheita e para a interação entre tipo de sistema e época de colheita. As contagens (médias e erros-padrão) de NVL foram maiores ($p < 0,05$) no sistema SSP (1,46±0,06), quando comparado ao SCP (1,09±0,06). Foram encontradas diferenças dessas contagens entre os dois sistemas de criação, nas colheitas de agosto e setembro de 2013, setembro e dezembro de 2014 e abril e junho de 2015 (Figura 10.6).

Os gêneros de parasitas gastrointestinais identificados nas coproculturas foram *Haemonchus*, *Cooperia*,

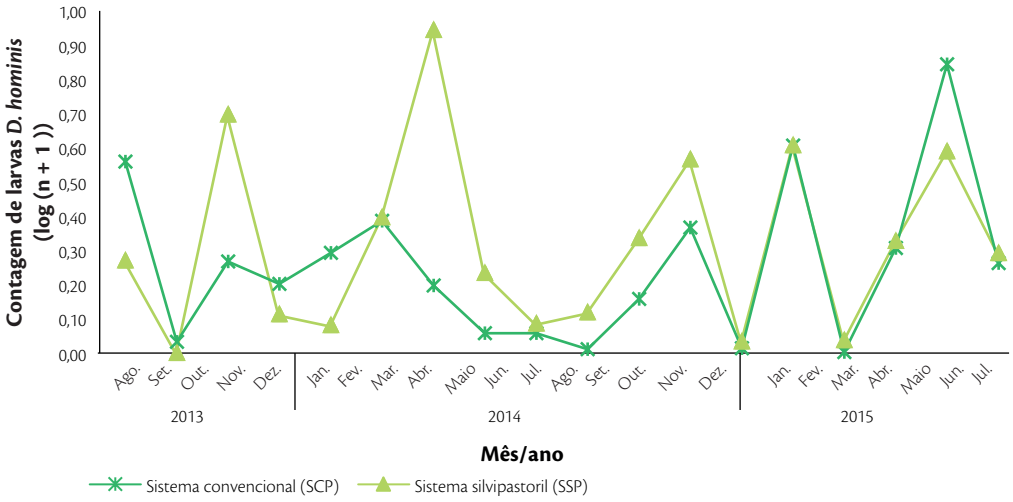


Figura 10.5. Média das contagens de larvas de *Dermatobia hominis* na pele dos bovinos criados em sistema silvipastoril (SSP) e convencional de pastagem (SCP) ao longo do período experimental.

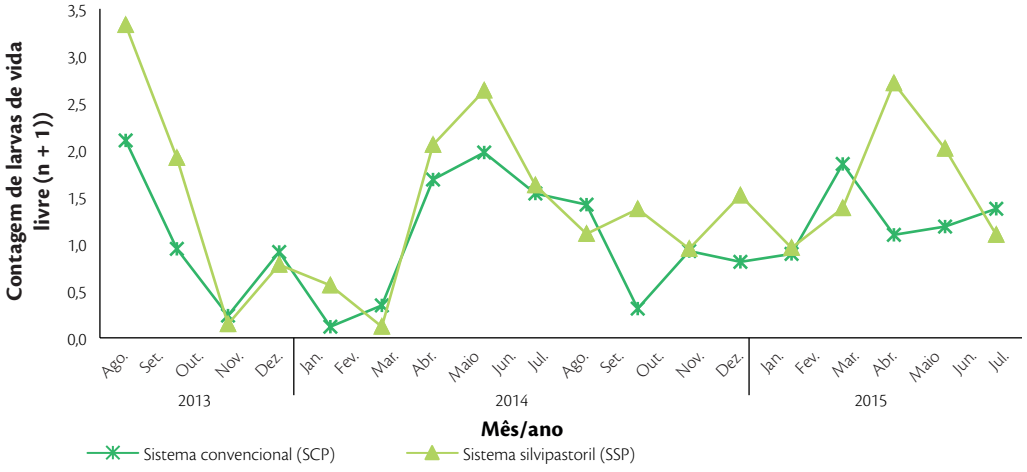


Figura 10.6. Média das contagens de nematódeos de vida livre (NVL) nas pastagens ao longo das colheitas.

Oesophagostomum e *Trichostrongylus*, em ambos os sistemas. Os bovinos criados no sistema SPS apresentaram uma média de ovos de parasitas gastrointestinais por grama de fezes (OPG) mais alta durante a maior parte do experimento (Figura 10.7). Os valores foram próximos entre os dois sistemas apenas em abril, agosto e dezembro de 2014 e março de 2015. A análise estatística dos dados indicou uma diferença significativa para o efeito do mês de coleta e do sistema ($p < 0,05$). Os valores médios de OPG transformados em logaritmo foram 1,65 ± 0,14 e 1,15 ± 0,20 para o SPS e CPS, respectivamente.

10.2.2.3 Macrofauna de dípteros e seus parasitoides associada ao bolo fecal

Foram identificadas seis morfoespécies de dípteros nos bolos fecais analisados: três morfoespécies da família Muscidae, sendo identificados indivíduos da espécie *Haematobia irritans*, duas morfoespécies da família Sarcophagidae e uma morfoespécie da família Fanniidae. Duas morfoespécies de Hymenoptera parasitoides das famílias Braconidae e Pteromalidae foram encontradas parasitando pupas de dípteros, sendo as morfoespécies identificadas como *Aphaereta* sp. e *Spalangia* sp.

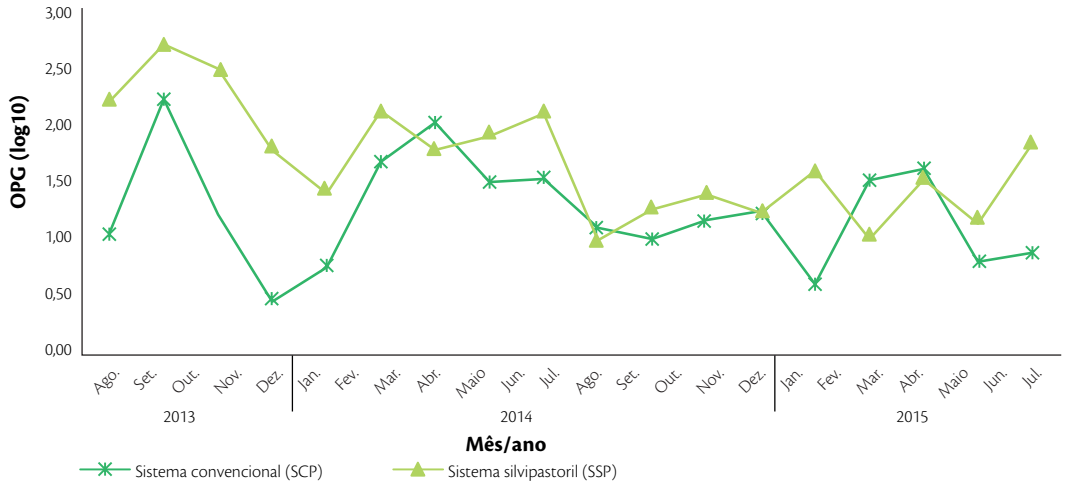


Figura 10.7. Coletas de OPG em bovinos criados nos sistemas silvipastoril (SSP) e convencional de pastagem (SCP) entre agosto de 2013 e julho de 2015. São Carlos-SP.

O efeito da época de avaliação (período estacional e ano) foi significativo ($p < 0,05$) sobre a ocorrência de pupas e adultos de dípteros e sobre o número de parasitoides de pupas. As estações do ano de maior umidade e temperatura (primavera e verão) foram as de maior ocorrência de pupas e adultos de dípteros. Contudo, as maiores ocorrências de parasitoides de larva-pupa se deram no outono (Tabela 10.4). O efeito do sistema de produção foi significativo ($p < 0,05$) apenas para a ocorrência de parasitoides de larva-pupa, e no SSP verificaram-se as maiores ocorrências das espécies de parasitoides *Aphaereta* sp. e *Spalangia* sp., em comparação ao sistema SCP (Tabela 10.5). As médias para as densidades desses parasitoides de *H. irritans* nos sistemas SSP e SCP foram respectivamente de 20,53 e 5,42 insetos a cada 10 bolos fecais (Tabela 10.5).

10.2.2.4 Análises dos serviços de regulação e suporte na ocorrência de ectoparasitas

A relação entre os ectoparasitas e o hospedeiro é multifatorial. É afetada pelas características do ambiente (temperatura, radiação, umidade e vegetação), aspectos do hospedeiro (idade, resistência geneticamente determinada, resposta imunológica e estado nutricional) e pela presença de inimigos naturais dos ectoparasitas, o que dificulta o isolamento, em condições de campo, dos fatores determinantes do resultado observado. As fases de vida dos parasitas que ocorrem fora do animal são mais vulneráveis à predação e morte em decorrência de condições ambientais adversas (Martínez; Merino, 2011). Fatores como baixa umidade do ar e do solo, altas temperaturas, alta velocidade dos ventos e elevada insolação estão associados ao dessecamento de ovos e de larvas, bem como maior gasto de energia pelo parasita (Furlong, 2005). A cobertura vegetal altera o microclima e pode formar nichos favoráveis à multiplicação, sobrevivência e capacidade de infestação dos parasitas.

Carrapatos vivem a maior parte do tempo fora do hospedeiro, de modo que a sobrevivência desse parasita pode ser crítica em condições de extremos ambientais, especialmente a sobrevivência de larvas que permanecem em diapausa à espera do hospedeiro (Estrada-Peña, 2009). As fêmeas de carrapatos que caem no solo procuram locais protegidos da luz, com temperatura ao redor de 25-27 °C para fazer a postura (Panda et al., 1992; Marcondes, 2001). De dezembro a março (verão), a temperatura média do solo nos dois sistemas variou de 24 °C a 27 °C, favorável ao sucesso da postura.

Nas pastagens da região Sudeste do Brasil, embora o desenvolvimento dos ovos e larvas dos carrapatos seja mais rápido no verão (úmido e quente), o ambiente é hostil, pois em condições de altas temperaturas as larvas se tornam mais sensíveis a alterações na umidade (Corson et al., 2004). Segundo Hitchcock (1955), o mínimo compatível com a embriogênese seria de 70% de umidade relativa, sendo 80% o ideal. A estação chuvosa 2013/2014 foi atípica, com acentuado déficit hídrico. Apesar disso, a umidade do ar

Tabela 10.4. Densidades de pupas e adultos de dípteros e densidade de parasitoides de pupas de dípteros em função do período estacional nos anos de 2013 a 2015.

Estação	Ano	Díptera		Parasitoides
		Pupa	Adulto	
Inverno	2013	13,00 bcd*	7,13 abc	5,00 b
Primavera	2013	59,25 abc	8,25 abc	1,88 b
Verão	2014	25,88 abcd	18,75 a	1,63 b
Outono	2014	6,50 cd	3,38 bc	33,63 ab
Inverno	2014	1,88 d	1,00 c	9,13 b
Primavera	2014	75,25 a	18,63 ab	1,75 b
Verão	2015	63,75 ab	28,13 a	8,75 b
Outono	2015	30,13 abcd	12,75 abc	54,5 a
Inverno	2015	11,63 bcd	–	–

*Médias seguidas por conjunto diferente de letras na coluna diferem entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). Traço (–): informação não aplicável.

Tabela 10.5. Médias do número de *Haematobia irritans* e parasitoides larva-pupa coletados em fezes de bovinos criados em sistemas silvipastorial (SSP) e convencional (SCP).

Sistema	*Haematobia irritans*	Parasitoides larva-pupa		
	Pupa	Adulto	*Aphaereta* sp.	*Spalangia* sp.	Total
SSP	9,83 a	3,67 a	15,61 a*	4,92 a	20,53 a
SCP	10,86 a	3,53 a	4,67 b	0,75 b	5,42 b

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P<0,05$). SSP: sistema silvipastoril (SSP); sistema convencional de pastagem (SCP).

ficou em torno de 80% nas duas áreas experimentais, com valores ligeiramente maiores no SCP.

Em condições de altas temperaturas, as larvas de carrapatos gastam muita energia se movimentando nas folhas das gramíneas, esgotando rapidamente suas reservas antes de conseguirem se prender ao hospedeiro (Furlong, 2005). O sombreamento da pastagem, pelas árvores ou pelo capim, pode contribuir para a maior viabilidade das larvas infectantes. Brovini et al. (2003) postularam que a maior altura do capim favoreceria a movimentação de fêmeas ingurgitadas, protegendo-as e favorecendo a ovoposição e, assim, o aumento da infestação das pastagens.

Em função do sombreamento das árvores, a maior altura do capim foi registrada no sistema SSP e pode estar associada à maior infestação por carrapatos neste sistema, comparado ao sistema SCP. Contudo, essa relação não foi absoluta. Vale notar que as condições em que houve predominância de carrapatos na pastagem solteira (SCP) se associaram à disponibilidade maior de sombra, exceto em dezembro/2013, indicando a interação com outros fatores. A interceptação da radiação solar pela copa das árvores foi significativamente maior no SSP, chegando a 40% no verão. Isso minimiza a importância do capim alto para manutenção de microclima favorável ao parasita nesse sistema.

O comportamento de bovinos na pastagem pode influenciar a infestação dos animais (Hawley; Altizer, 2011). Formas de vida livre de carrapatos têm sobrevivência e mobilidade limitadas, dependendo, portanto, do comportamento do hospedeiro para a infestação (Garine-Wichatitsky et al., 1999). Durante o verão, o estresse por calor é comum nos trópicos. Uma das estratégias inicialmente adotadas por bovinos para reduzir a carga térmica é buscar abrigo da radiação incidente (Takahashi et al., 2009; Brunetti et al., 2025). A busca de sombra por parasita e por hospedeiro aumentou a oportunidade de infestação do bovino no SSP (Corson et al., 2004).

Além desses fatores, as condições de saúde do hospedeiro interagem com a sua capacidade de resistir ou reagir à infestação (Martínez; Merino, 2011). A manutenção da resposta imunológica tem alto custo energético (Hawley; Altizer, 2011), e durante períodos de restrição alimentar, os indivíduos redistribuem a energia para

sistemas fisiológicos vitais, negligenciando o sistema imune (Martínez; Merino, 2011). Assim, durante fases de menor disponibilidade de alimento de boa qualidade, a resposta imune pode estar comprometida, aumentando a infestação do hospedeiro. Essa é uma das razões aventadas para a ocorrência de maiores surtos de infestação por carrapatos na estação seca (Oliveira et al., 1989), embora esta época seja menos propicia para a reprodução e desenvolvimento das larvas no campo, devido às menores temperatura e umidade. Verificou-se que a temperatura do solo e a umidade do ar começaram a se aproximar da faixa desejável para desenvolvimento dos ovos de carrapato em torno de outubro/novembro, de modo que era de esperar um aumento na concentração de carrapatos em janeiro, quando, ao contrário, as infestações foram muito baixas. Nessas ocasiões, os animais estavam ganhando peso (dados complementares em Nicodemo et al., 2015), o que indica adequada disponibilidade de alimento.

Os inimigos naturais, presentes no SSP, podem ter contribuído para o controle dos carrapatos, como relataram Giraldo e Uribe (2007). A maior complexidade estrutural desse sistema favorece a biodiversidade, que, em regra, é fundamental para a redução do parasitismo (Grønvold et al., 1996; Keesing et al., 2009; Civitello et al., 2015). Assim, no SSP, foi evidenciada a maior quantidade de nematódeos de vida livre e diversidade da macrofauna de predadores associada ao bolo fecal. De acordo com Samish e Rehacek (1999), bactérias, fungos, aranhas, formigas, besouros e pássaros, entre outros, controlam a população de carrapatos. Eles atacam especialmente as fêmeas ingurgitadas, vulneráveis e de alto valor nutricional, fato que pode estar relacionado com a observação de Brovini et al. (2003), do desaparecimento, por predação ou por perda de visualização, de 11% das fêmeas de carrapato no verão e 1,7% no inverno, no estado de Minas Gerais, no Sudeste do Brasil.

Ambientes de alta diversidade favorecem o controle de pragas e de doenças (Civitello et al., 2015). Maior diversidade da cobertura vegetal implica maior disponibilidade potencial de recursos ao longo do ano, como abrigo e alimento, e, por conseguinte, favorecem uma variedade de organismos. Observamos menor infestação por mosca-do-chifres em bovinos criados no SSP. Nossos resultados estão de acordo com as observações de Giraldo et al. (2011). Esses autores associaram as menores infestações por *H. irritans* em animais criados nos SSP à presença de diversos predadores das larvas desses dípteros nos bolos fecais dos bovinos. Soca et al. (2002) relataram maior degradação do bolo fecal no sistema silvipastoril comparados à pastagem solteira (94% *vs.* 40%), relacionando-a à maior riqueza da fauna edáfica, especialmente coleópteros coprófagos. Esses besouros destroem e enterram o bolo fecal, expondo ovos e larvas de parasitas a outros predadores e aumentando os riscos de ressecamento.

Centenas de espécies de insetos foram associadas ao bolo fecal bovino (Skidmore, 1991). Em sua maioria são benéficos: ajudam na destruição do bolo fecal e no controle de nematódeos e mosca-dos-chifres. A presença de diferentes organismos que utilizam os excrementos como abrigo, reprodução e alimentação, ou estabelecem interações de competição, parasitismo e predação com outros organismos também influenciam a sobrevivência da fase de vida livre dos parasitas de bovinos nas pastagens (Bianchi; Catto, 2008). Verificamos que a ocorrência de pupas e adultos de dípteros foi semelhante nos dois sistemas, mas o número de parasitoides de pupa e a diversidade de predadores foram maiores no SSP. Esses dados indicam que os inimigos naturais foram capazes de controlar, ao menos parcialmente, a população de mosca-dos-chifres nas pastagens. Há relatos de que os inimigos naturais, predadores e parasitoides podem limitar a reprodução de *H. irritans* nas fezes em cerca de 90%, atacando larvas e pupas (Honer et al., 1993). O aumento da diversidade e abundância de besouros coprófagos, em pastagens com alta densidade de plantas lenhosas, favoreceu a ocupação da área com espécies que controlam a população de parasitas (Giraldo et al., 2011).

Os estágios adultos da mosca-dos-chifres são mais independentes das condições do ambiente, portanto, o ponto crítico para controle da mosca-dos-chifres são as fases que se desenvolvem dentro das fezes: ovos, larvas e pupas (Honer et al., 1993). A maioria dos artrópodes que controlam a mosca-dos-chifres pertence às ordens Hymenoptera, como os parasitoides *Spalangia migroaema* e *Spalangia cameronie* e a formiga predadora *Solenopsis invicta*; Coleoptera predadores das famílias Histeridae, Hidrofilidae e Staphylinidae (Brito et al., 2005). Nos bolos fecais de bovinos mantidos em sistemas SSP e SCP foram identificadas as espécies de parasitoides de pupas de díptera: *Aphaereta* sp. (Braconidae) e *Spalangia* sp. (Pteromalidae). A macro-

fauna de predadores foi composta por Coleoptera (Scarabaeidae, Histeridae, Anthicidae, e Staphylinidae); Diptera (Stratiomyidae); Hemiptera (Anthocoridae); Dermaptera (Labiduridae); Hymenoptera (Formicidae), Arachnida (Acari e Araneae), Malacostraca (Isopoda) e Scolopendromorpha (Scolopendridae).

Infestações por larvas de *D. hominis* ocorrem com maior frequência em regiões de clima mais quente durante o dia e fresco à noite, onde a vegetação é densa e há disponibilidade de hospedeiros de sangue quente para a manutenção do ciclo do parasita (Borja, 2004). Os adultos da mosca-do-berne são primariamente habitantes das florestas tropicais, e campos abertos parecem funcionar como barreiras à sua dispersão. Quando os adultos emergem do pupário, refugiam-se em ambientes florestais onde se alimentam de seiva das plantas. Marsden et al. (1979) observaram que bovinos que permaneciam mais tempo debaixo das copas de árvores, onde *D. hominis* e os dípteros foréticos ocorrem conjuntamente, apresentavam maior taxa de infestação. Assim, esperávamos que as infestações por bernes fossem maiores no SSP, o que não foi observado, reforçando a possibilidade de eficiente controle biológico.

Entre os insetos que transportam os ovos da mosca-do-berne *Sarcopromus capruna*, *Stomoxys calcitrans*, *Musca domestica*, *Fannia pusio* e *Haematobia irritans* são consideradas as espécies mais importantes (Borja, 2004). Duas morfoespécies da família Sarcophagidae e uma da família Fanniidae foram encontradas nos bolos fecais dos bovinos criados tanto no SSP quanto no SCP, apontando para a presença dos vetores no ambiente. A fase de pupa de *D. hominis* é a que fica mais exposta ao ataque de predadores, já que ocorre no solo e pode durar até 120 dias, nos períodos mais frios do ano (Marcondes, 2001). Porém, esse instar apresenta uma grande resistência ao ataque de vários vírus, bactérias, fungos, protozoários e nematódeos encontrados no solo. Por outro lado, micro-himenópteros, como *Trichopria* (*Ashmeadropia*) *mendesi*, *Spalangia nigroaeneae*, *Tachinaephagus zealandicus*, já foram observados parasitando pupas de *D. hominis*. As espécies de formigas *Solenopsis germinata*, *S. invicta*, *Steatoma quadridense*, *Pheidola fallax* foram observadas predando larvas e pré-pupas do berne. O ácaro *Macrocheles muscaedomesticae* foi observado sobre pupas e adultos da *D. hominis* (Borja, 2004). Dentre os himenópteros predadores associados ao bolo fecal, a densidade de *Solenopsis* sp. nas estações da primavera, verão e outono foram de 125, 34 e 156 insetos por 15 bolos fecais, respectivamente, no SSP, cuja ocorrência não foi registrada no SCP. Além de *Solenopsis* sp., duas morfoespécies de ácaros e uma morfoespécie de percevejo (Anthocoridae) ocorreram em densidade populacional significativamente maior no SSP, embora não seja possível assegurar seu papel como predador.

Para concluir, podemos afirmar que as alterações ambientais promovidas pela presença de árvores no SSP, notadamente a redução da radiação solar e da velocidade dos ventos e o aumento da abundância e riqueza da fauna associada às pastagens, podem afetar a quantidade de ectoparasitas nos bovinos criados nesse tipo de sistema. Para moscas-dos-chifres, observamos níveis de infestação significativamente menores no SSP. Quanto aos outros ectoparasitas, de maneira geral não foram observadas diferenças entre os dois sistemas.

10.2.3 Avaliação do serviço ambiental do besouro coprófago *Digitonthophagus gazella* na produção de forragem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã

O rebanho bovino brasileiro compreende mais de 200 milhões de cabeças. Estima-se que diariamente são produzidas pelas excretas bovinas em torno de 140.284 toneladas de carbono, 4.760 toneladas de nitrogênio, 1.326 toneladas de fósforo, 2.278 toneladas de potássio, 4.284 toneladas de cálcio, 1.598 toneladas de magnésio e 782 toneladas de enxofre. Grande parte desses nutrientes é perdida para a atmosfera e lençóis d'água, via volatilização e escorrimento superficial pela permanência das excretas na superfície do solo. Os escarabeíneos (Coleoptera: Scarabaeidae), vulgarmente conhecidos como besouro rola-bosta, desempenham importante papel ambiental nos ecossistemas, devido ao hábito de utilizar fezes para alimentação e reprodução. Estudos em pastagens de *B. decumbens* registraram que indivíduos da espécie exótica *Digitonthophagus gazella* (Fab.) incorporaram ao solo 70% das fezes bovinas em 10 dias (Miranda et al., 2000). A introdução de *D. gazella* na década de 1980 no Brasil teve como objetivos o controle de mosca-dos-chifres e helmintos gastrintestinais. Além disso, esses insetos realizam outros serviços ambientais, como a limpeza da pastagem com a redução da área de rejeição de forragem contaminada por fezes, a ciclagem de nutrientes e a mitigação da emissão de

gases de efeito estufa oriundos das excretas. Porém, são escassas as pesquisas referentes à mensuração de tais serviços ambientais.

Em casa de vegetação foi avaliado o efeito do enterrio de excretas bovinas feito por *D. gazella* na produção de matéria seca da forrageira *Urochloa brizantha* c.v BRS Piatã. O experimento foi realizado na Embrapa Pecuária Sudeste, entre novembro de 2015 e maio de 2016. Os fatores em estudo foram solo (S); 1,6 litro de fezes frescas de bovino (F); 1,5 litro de urina (U) e cinco casais de *D. gazella* (B), compreendendo oito tratamentos (S; SF; SU; SB; SFU; SFB; SUB e SFUB). A unidade experimental foi composta por tubo de PVC (300 mm Ø e 1.200 mm altura), preenchida com solo até a altura de 1.000 mm. O solo apresentava as seguintes características pH ($CaCl_2$) = 4,4; M.O = 14 g/dm^3; P = 3 mg/dm^3; V = 12% e Argila = 331g/dm^3 (textura média argilosa). A avaliação da percentagem de enterrio de fezes foi realizada aos sete dias da instalação do experimento, através da avaliação visual da porcentagem do volume original de fezes (PVF) mantido sobre o solo. O capim Piatã foi semeado aos 90 dias após a instalação do experimento. Aos 60 dias após a semeadura, foi realizado o 1º corte da forragem à altura de 10 cm acima da superfície do solo. As amostras de forragem foram secas em estufa a 70 °C por 72 horas e em seguida pesadas para determinação da matéria seca (MS). Os dados de MS e PVF foram submetidos à ANOVA e teste de Duncan a 5% de significância.

O besouro coprófago foi eficiente no enterrio de fezes ao solo, 75% do volume de fezes aplicado foi enterrado em até sete dias (Figura 10.8). Verificou-se diferença significativa entre a produção de matéria seca para os tratamentos formados por fezes e na presença de besouro coprófagos (Figura 10.9).

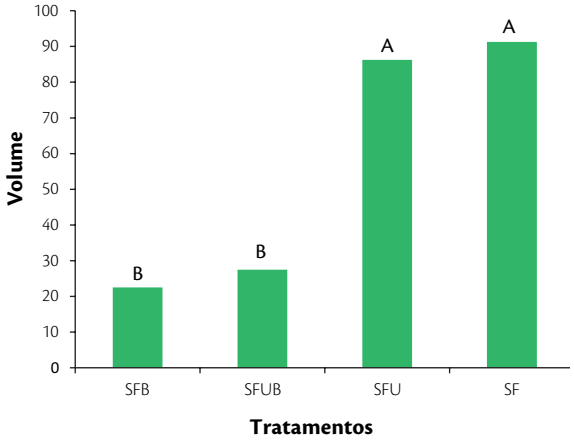


Figura 10.8. Volume de fezes aos sete dias após aplicação dos tratamentos. São Carlos-SP. Maio de 2016. Colunas de dados com letras iguais apresentam médias semelhantes pelo teste de Duncan a P<0,05.

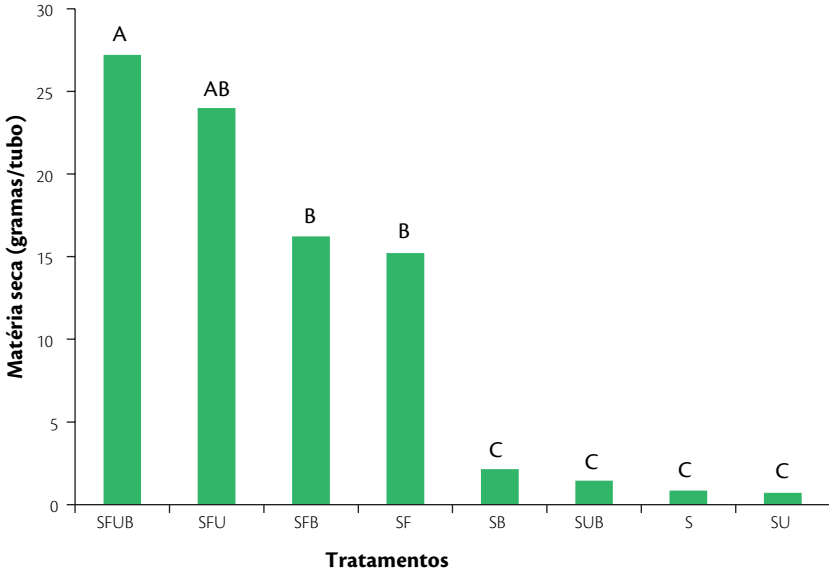


Figura 10.9. Produção de matéria seca de *U. brizantha* em função da presença no solo dos fatores: fezes bovina (F), urina bovina (U) e besouro rola-bosta (B). São Carlos-SP. Maio de 2016. Colunas de dados com letras iguais apresentam médias semelhantes pelo teste de Duncan a p < 0,05.

10.2.4 Avaliação do serviço ambiental de controle biológico de lepidópteras associadas a *Croton floribundos* por himenópteras parasitoides no sistema silvipastoril

No sistema SSP, espécies madeireiras (pau-jacaré, angico-branco, canafístula, jequitibá e ipê-felpudo) foram plantadas em três faixas centrais, enquanto árvores tutoras (capixingui e mutambo) foram dispostas em duas faixas marginais, visando fornecer recursos à fauna, proteger o solo e criar um microclima favorável ao avanço da sucessão ecológica (Vilela et al., 1993).

Para avaliar como a presença de árvores em pastagens (SSP) beneficia o aumento e manutenção da diversidade de insetos e a regulação do serviço ecossistêmico de controle biológico, Siqueira e Reigada (2024) investigaram a fauna de lepidópteros e parasitoides associada ao capixingui (*Croton floribundus* Spreng, Euphorbiaceae). Trinta e oitos árvores foram selecionadas aleatoriamente como pontos centrais de amostragem em áreas de sistemas SSP e bordas de SCP. Cada ponto foi georreferenciado e, em um raio de 10 m ao redor, todas as árvores de capixingui também foram amostradas.

As coletas ocorreram quinzenalmente entre julho de 2021 e dezembro de 2022, com uso de guarda-chuva entomológico em ambientes abertos e, quando necessário, busca direta. Larvas de lepidóptera coletadas foram mantidas em potes plásticos com folhas de capixingui em laboratório, para alimentação dos insetos até a emergência de adultos ou parasitoides. A avaliação da diversidade, estrutura e composição da comunidade de lepidóptera e parasitoides associados foi feita através de métricas da análise faunística (constância, frequência, abundância e dominância das espécies) com auxílio do programa ANAFAU de Moraes et al. (2003) e índices de diversidade (Shannon e Weiner, Equitabilidade).

A área SSP apresentou maior riqueza de espécies de lepidópteros (n=63) em comparação à SCP (n=58), com 10 espécies exclusivas do sistema SSP e cinco espécies exclusivas do SCP. No sistema SSP, foram coletadas 814 lagartas, distribuídas em 15 famílias e 63 espécies, das quais 22,97% (n=187) estavam parasitadas por 46 espécies de parasitoides. Na SCP, foram obtidas 411 lagartas, agrupadas em 58 espécies, com 24,33% (n=100) parasitadas por 29 espécies de parasitoides (Tabela 10.6).

A diversidade foi praticamente igual nas áreas dos dois sistemas de paisagem, o que indica que ambas apresentam uma riqueza e abundância relativa de espécies muito semelhantes. Em termos práticos, a comunidade de espécies em ambos os sistemas é comparável em complexidade. Entretanto, a área SCP possui maior equitabilidade que a SSP, indicando que, embora ambas tenham diversidade quase idêntica, na área SCP os indivíduos estão distribuídos de forma mais uniforme entre as espécies. Já na área SSP, apesar de a diversidade também ser alta, há uma leve dominância de algumas espécies em relação a outras (Tabela 10.6).

A análise faunística mostrou que, dentre os lepidópteros encontrados na pastagem SSP, 39,7% foram considerados dominantes na comunidade, enquanto na borda da pastagem SCP esse valor foi de 20,7%. As espécies frequentes (com maior número relativo de indivíduos) foram seis na SSP e oito na SCP. No entanto, a SSP apresentou maior número de espécies constantes (presentes em mais de 50% das coletas), totalizando 17 espécies, em comparação com apenas sete na SCP (Figura 10.10). Esses resultados sugerem

Tabela 10.6. Análise para diversidade taxonômica das comunidades de lepidópteros nas áreas de pastagem silvipastoril (SSP) e convencional de pastagem (SCP).

Lepidópteros	SSP	SCP
Número de espécies	63	58
Número total de indivíduos	814	411
Índice de diversidade (Shannon – Weaner)	2.9576 (2.953866 - 2.961382)	2.9500 (2.942874 - 2.957061)
Índice de uniformidade ou equitabilidade	0.7139	0.7265

SSP: sistema silvipastoril; SCP: sistema convencional de pastagem.



Figura 10.10. Índices da Análise Faunística das espécies de lepidóptera e himenóptera parasitoides encontradas em áreas de pastagem com sistema silvipastoril (SSP) (A) e convencional (SCP) (B) na Fazenda Canchim no período de junho de 2021 a dezembro de 2022. HD, HMF e HC representam, respectivamente, número de espécies de lepidópteras hospedeiros dominantes, mais frequentes e constantes. PD, PMF e PC representam, respectivamente, número de espécies parasitoides dominantes, mais frequentes e constantes ao longo do período de estudo.

que o sistema SSP favorece o estabelecimento e persistência de mais espécies ao longo do tempo, possivelmente devido a condições mais estáveis ou maior heterogeneidade ambiental, embora fatores como a disponibilidade de recursos também possam estar envolvidos.

A comunidade de parasitoides foi mais rica e abundante na pastagem SSP (46 espécies, n=761) do que na pastagem SCP (29 espécies, n=187). No entanto, a diversidade (H') e a equitabilidade foram menores na SSP, indicando maior dominância de algumas espécies sobre as demais (Tabela 10.7). A análise faunística revelou que 19,6% das espécies de parasitoides na SSP foram classificadas como dominantes, em comparação com 13,8% na SCP. A frequência relativa das espécies também foi maior na SSP, enquanto a constância, presença das espécies ao longo das coletas, foi semelhante nos dois tipos de pastagem (Figura 10.9).

Os resultados obtidos sugerem que, embora a pastagem SSP sustente uma comunidade mais rica e numerosa de parasitoides, essa comunidade é estruturalmente menos equilibrada, com poucas espécies dominando a maior parte dos indivíduos. Isso pode refletir maior disponibilidade de hospedeiros específicos, indicando que os parasitoides estão respondendo à presença de lepidópteros hospedeiros e, portanto, atuando mais intensamente na prestação do serviço ecossistêmico de controle biológico.

Tabela 10.7. Análise para a diversidade taxonômica das comunidades de parasitoides nas áreas de pastagem silvipastoril (SSP) e convencional de pastagem (SCP).

Parasitoides	SSP	SCP
Número de espécies	46	29
Número total de indivíduos	761	187
Índice de diversidade H' (Shannon – Weaner)	2.5185 (2.514956 - 2.522138)	2.7401 (2.729046 - 2.751237)
Índice de uniformidade ou equitabilidade	0.6578	0.8138

SSP: sistema silvipastoril; SCP: sistema convencional de pastagem.

10.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das relações entre a biodiversidade e a integridade funcional é fundamental para avaliar as consequências ambientais do uso das tecnologias de integração lavoura, pecuária, floresta; sobretudo nas paisagens tropicais dominadas pela pecuária. Os estudos conduzidos nas últimas décadas em sistemas silvipastoris na Embrapa Pecuária Sudeste mostram que os sistemas de integração floresta, pastagem e bovino apresentam benefícios variáveis, mas consistentes, de vários processos ecológicos controlados pelo microclima e diversidade de invertebrados, sobretudo insetos associados ao bolo fecal e às espécies florestais. A conversão de pastagens convencionais em integração com espécies florestais nativas ou exóticas contribui para o desenvolvimento de uma pecuária sustentável.

O sistema silvipastoril (SSP) demonstrou ser vantajoso em termos de riqueza e abundância de lepidópteros e seus inimigos naturais, os himenópteros parasitoides. A maior complexidade estrutural do SSP, promovida pela presença de árvores nativas e tutoras, parece favorecer o estabelecimento e a persistência de uma fauna mais diversa ao longo do tempo, como indicado pelo maior número de espécies exclusivas e constantes, tanto de lepidópteros quanto de parasitoides. No entanto, a análise da estrutura das comunidades revelou que, apesar dessa maior riqueza, a equitabilidade no SSP foi menor, com maior dominância de poucas espécies. Esse padrão sugere que as condições do SSP podem favorecer seletivamente determinadas espécies, o que, por um lado, pode indicar uma resposta direcionada à disponibilidade de hospedeiros e, por outro, pode limitar a estabilidade funcional da comunidade em longo prazo.

Em contraste, o sistema convencional de pastagens (SCP) apresentou comunidades mais equilibradas, com maior uniformidade na distribuição dos indivíduos entre as espécies, ainda que com menor riqueza total. Isso pode refletir um ambiente mais homogêneo e com menor oferta de nichos ecológicos. Portanto, o SSP se destaca como alternativa promissora para conciliar produção pecuária e conservação da biodiversidade, promovendo o serviço ecossistêmico de controle biológico. Contudo, seu sucesso depende do manejo adequado da vegetação e da manutenção da heterogeneidade ambiental, de modo a garantir não apenas a riqueza, mas também o equilíbrio funcional das comunidades biológicas.

10.4 REFERÊNCIAS

BIANCHIN, I.; CATTO, J. B. Epidemiologia e alternativas de controle de helmintos em bovinos de corte na Região Central do Brasil. 2008. Disponível em: http://helminto.inta.gob.ar/Congreso%20Brasil%202008/EPIDEMIOLOGIA%20E%20ALTERNATIVAS%20DE%20CONTROLE%20DE%20HELMINTOS%20EM%20BOVINOS%20DE%20CORTE%20NA%20REGI%C3%83O%20CENTRAL%20DO%20BRASIL.pdf.

BORJA, G. E. M. Controle biológico do berne, Dermatobia hominis, e de seus foréticos: crise e perspectiva. Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária, v. 13, p. 111-113, 2004.

BRITO, L. G.; BORJA, G. E. M.; OLIVEIRA, M. C. S.; SILVA NETTO, F. G. Mosca-dos-chifres: aspectos bioecológicos, importância econômica, interações parasito-hospedeiro e controle. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2005. (Comunicado Técnico, 302).

BROVINI, C. N.; FURLONG, J.; CHAGAS, A. C. Influência dos fatores climáticos na biologia e no comportamento de fêmeas ingurgitadas de Boophilus microplus a campo. Bioscience Journal, v. 19, p. 71-76, 2003.

BROWN, J.; SCHOLTZ, C. H.; JANEAU, J. L.; GRELLIER, S.; PODWOJEWSKI, P. Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) can improve soil hydrological properties. **Applied Soil Ecology**, v. 46, n. 1, p. 9-16, 2010. http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.05.010.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: Enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025. http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

CALOW, P. Towards a definition of functional ecology. **Functional Ecology**, v. 1, n. 1, p. 57-61, 1987. http://doi.org/10.2307/2389358.

CARRAPATO: problemas e soluções. Editor: John Furlong. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2005. 65 p.

CIVITELLO, D. J.; COHEN, J.; FATIMA, H. et al. Biodiversity inhibits parasites: broad evidence for the dilution effect. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 112, n. 28, p. 8667-8671, 2015.

CORSON, M. S.; TEEL, P. D.; GRANT, W. E. Microclimate influence in a physiological model of cattle-fever tick (Boophilus spp.) population dynamics. Ecological Modelling, v. 180, p. 487-514, 2004.

ESTRADA-PEÑA, A. Tick-borne pathogens, transmission rates and climate change. Frontiers in Bioscience, v. 14, p. 2674-2687, 2009.

FERRARI, A. C. et al. Comparação dos padrões de atratividade de Hermetia illucens associada a carcaças de Rattus norvegicus enterradas e tratadas com hormônios esteróides. Revista Brasileira de Entomologia, v. 53, n. 4, dez. 2009.

FLÓREZ, J. F.; LOUHAICHI, M.; YIGEZU, Y. A.; ABDRAHMANE, W.; WORQLUL, A.; HASSAN, S.; BELGACEM, A. O.; SANDOVAL, D.; JUNCA, J. J.; NOTENBAERT, A.; KARANJA, S.; BURKART, S. **Ecosystem services and environmental benefits in livestock systems: definition of terms, and valuation methods**. Roma: CGIAR, 2023. 10 p. (CGIAR Policy Brief Series). E-book. Disponível em: https://agritrop.cirad.fr/611399/1/Policy%20Brief%20LyC%20-%20Ecosystem%20services%20_EN.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

FRANCO, A. J.; SILVA, A. P. V.; SOUZA, A. B. S.; OLIVEIRA, R. L.; BATISTA, É. R.; SOUZA, E. D.; SILVA, A. O.; CARNEIRO, M. A. C. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e64026, 2020. http://doi.org/10.1590/1983-40632020v5064026.

GARINE-WICHATITSKY, M. de et al. Spatial and temporal distributions of parasites. Parasitology, v. 119, p. 455-466, 1999.

GIRALDO, C. et al. The adoption of silvopastoral systems promotes ecological recovery. Insect Conservation and Diversity, v. 4, p. 115-122, 2011.

GIRALDO, C.; URIBE, F. Manejo integrado de garrapatas en sistemas sostenibles. Roma: FAO, 2007.

GRØNVOLD, J. et al. Biological control aspects of parasites. Veterinary Parasitology, v. 64, p. 47-64, 1996.

GUSMÃO, M. R.; INÁCIO, G. R.; OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Diversity of invertebrates associated with dung patches in two livestock systems. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS, 2015, Brasília, DF. **Anais** [...]. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

GUSMÃO, M. R.; OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Insect richness in dung patches of cattle raised in two livestock systems. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 1, p. 9-17, 2020. http://doi.org/10.32404/rean.v7i1.4033.

HAINES-YOUNG, R. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.2 and Guidance on the Application of the Revised Structure**. Nottingham: Barton in Fabis, 2023. 33 p.

HAWLEY, D. M.; ALTIZER, S. M. Disease ecology meets ecological immunology. Functional Ecology, v. 25, p. 48-60, 2011.

HITCHCOCK, L. F. Studies of the non-parasitic stages on the cattle tick. Australian Journal of Zoology, v. 3, p. 295-311, 1955.

HONER, M. R.; BIANCHIN, I.; GOMES, A. Mosca-dos-chifres: histórico, biologia e controle. Campo Grande: Embrapa-CNPGC, 1993.

KEESING, F. et al. Hosts as ecological traps for the vector of Lyme disease. Proceedings of the Royal Society B, v. 276, p. 3911-3919, 2009.

LAURETO, L. M. O.; CIANCIARUSO, M. V.; SAMIA, D. S. M. Functional diversity: an overview of its history and applicability. **Natureza & Conservação**, v. 13, n. 2, p. 112-116, 2015. http://doi.org/10.1016/j.ncon.2015.11.001.

MARCONDES, C. B. Entomologia médica e veterinária. São Paulo: Atheneu, 2001. 432 p.

MARSDEN, P. D.; SHELLEY, A. J.; ARMITAGE, P. Dermatobia hominis lesions in zebu cow hides. Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene, v. 73, p. 458-459, 1979.

MARTÍNEZ, J.; MERINO, S. Host-parasite interactions under extreme climatic conditions. Current Zoology, v. 57, p. 390-405, 2011.

MIRANDA, C.; SANTOS, J.; BIANCHIN, I. The role of *Digitonthophagus gazella* in pasture cleaning and production as result of burial of cattle dung. **Pasturas Tropicales**, v. 22, n. 1, p. 14-18, 2000.

MORAES, R. C. B.; HADDAD, M. L.; SILVEIRA NETO, S.; REYES, A. E. L. Software para análise faunística – ANAFAU. In 8º SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 2003, São Pedro. **Anais** [...]. Piracicaba: SEB, 2003.

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVESI, O. Serviços ambientais em sistemas silvipastoris. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (eds.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 139-152.

NICODEMO, M. L. F.; OLIVEIRA, M. C. S.; BILHASSI, T. B.; NÉO, T. A.; GONÇALVES, T. C.; RABELO, M. D.; GIGLIOTI, R.; PEZZOPANE, J. R. M.; GUSMÃO, M. R. La infección con parásitos gastrointestinales e infestación por ectoparasitos en el ganado

en el sistema silvopastoral en comparación con el sistema convencional. In: CONGRESO NACIONAL DE SISTEMAS SILVOPASTORILES, 3.; CONGRESO INTERNACIONAL SISTEMAS AGROFORESTALES, 8., 2015, Iguazú-Misiones. **Anais** [...]. Iguazú-Misiones: INTA, 2015. p. 27-30.

OLIVEIRA, G. P. de; ALENCAR, M. M. de; FREITAS, A. R. de. Resistência de bovinos ao carrapato Boophilus microplus. II. Infestação natural. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 24, n. 10, p. 1267-1271, 1989.

OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; GUSMÃO, M. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BILHASSI, T. B.; SANTANA, C. H.; GONÇALVES, T. C.; RABELO, M. D.; GIGLIOTI, R. Differential *Haematobia irritans* infestation levels in beef cattle raised in silvopastoral and conventional pasture systems. **Veterinary Parasitology**, v. 246, n. 1, p. 96-99, 2017a. http://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.08.020.

OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; GUSMÃO, M. R.; CHAGAS, A. C. S.; GIGLIOTI, R.; BILHASSI, T. B.; SANTANA, C. H.; GONÇALVES, T. C.; RABELO, M. D.; NÉO, T. A. Gastrointestinal nematode infection in beef cattle raised in silvopastoral and conventional systems in São Paulo state, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 91, n. 3, p. 495-507, 2017b. http://doi.org/10.1007/s10457-016-9950-y.

PANDA, D. N. et al. Development and survival periods of Boophilus microplus. Veterinary Parasitology, v. 44, p. 275-283, 1992.

SAMISH, M.; REHACEK, J. Pathogens and predators of ticks. Annual Review of Entomology, v. 44, p. 159-182, 1999.

SIQUEIRA, M. A.; REIGADA, C. Efeito de gradientes de distúrbio na estruturação, composição e diversidade de interações de redes hospedeiro-parasitoide. 2024. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

TILMAN, D.. Functional Diversity. In LEVIN, S. A. (ed.). **Encyclopedia of biodiversity**. 2. ed. New York: Academic Press, 2001. p. 587-596. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00061-7.

SKIDMORE, P. Insects of the British cow-dung community. Shrewsbury: Field Studies Council, 1991.

SOCA, M.; SIMÓN, L.; SÁNCHEZ, S.; GÓMEZ, E. Dinámica parasitológica en bostas de bovinos bajo condiciones silvopastoriles. **Agroforestería en las Américas**, v. 9, n. 33-34, p. 38-42, 2002.

TAKAHASHI, L. S.; BILLER, J. D.; TAKAHASHI, K. M. Bioclimatologia zootécnica. Jaboticabal: Unesp, 2009.

VILELA, E. A.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GAVILANES, M. L.; DE CARVALHO, D. A. Espécies de matas ciliares com potencial para estudos de revegetação no alto Rio Grande, sul de Minas. Revista Árvore. **Viçosa**, v. 17, n. 2, p. 117-128, 1993.

Capítulo 11

Sequestro de Carbono

Patrícia Perondi Anchão Oliveira, Thaís Alves Carvalho, Wilfredo Manuel Rios Rado, Alex Calderaro Peruchi, Alberto Carlos de Campos Bernardi, José Ricardo Macedo Pezzopane, Amanda Maria Tadini, Ladislau Martin Neto



RESUMO: A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) constitui uma estratégia central para a intensificação sustentável da agropecuária brasileira, aliando produtividade e conservação ambiental em um mesmo espaço. Este capítulo discute de forma detalhada o sequestro de carbono em sistemas integrados, com ênfase nos compartimentos arbóreo e edáfico, a partir de evidências obtidas em experimentos de longa duração conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste. São abordados os processos de acúmulo e estabilização do carbono no solo, a importância da matéria orgânica e das interações com a microbiota edáfica, bem como o papel das árvores no incremento da biomassa aérea e na formação de estoques duradouros. Adicionalmente, são comparados os estoques de carbono entre sistemas ILPF, pastagens extensivas e remanescentes florestais, evidenciando as vantagens da integração na mitigação das emissões de gases de efeito estufa e na melhoria da resiliência dos ecossistemas produtivos. O capítulo também discute limitações metodológicas e a necessidade de avaliações de longo prazo e em perfis de solo mais profundos, que considerem diferentes arranjos espaciais, espécies arbóreas e condições edafoclimáticas. Ao integrar resultados científicos recentes e práticas de manejo, o texto contribui para o avanço do conhecimento sobre o potencial da integração em sistemas pecuários (ILP, IPF e ILPF) no contexto tropical e fornece subsídios técnicos para formulação de políticas públicas e estratégias de mitigação climática, reforçando seu papel como ferramenta de sustentabilidade.

Palavras-chave: Sequestro de Carbono; Solo; Biomassa Arbórea; Sustentabilidade; Mitigação Climática.

ABSTRACT: Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) systems constitute a central strategy for the sustainable intensification of Brazilian agriculture, combining productivity and environmental conservation in the same space.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-11

This chapter discusses in detail carbon sequestration in integrated systems, with emphasis on the tree and soil compartments, based on evidence obtained from long-term experiments conducted at Embrapa Pecuária Sudeste. The processes of carbon accumulation and stabilization in soil, the importance of organic matter and its interactions with soil microbiota, and the role of trees in increasing aboveground biomass and forming long-lasting stocks are addressed. Additionally, carbon stocks between ICLF systems, extensive pastures, and forest remnants are compared, highlighting the advantages of integration in mitigating greenhouse gas emissions and improving the resilience of productive ecosystems. The chapter also discusses methodological limitations and the need for long-term assessments and deeper soil profiles that consider different spatial arrangements, tree species, and edaphoclimatic conditions. By integrating recent scientific results and management practices, the text advances knowledge of the potential of integration in livestock systems (ICL, ILF, and ICLF) in the tropical context. It provides technical support for the formulation of public policies and climate mitigation strategies, reinforcing its role as a sustainability tool.
Keywords: Carbon Sequestration; Soil; Tree Biomass; Sustainability; Climate Mitigation.

11.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas intensificam os desafios enfrentados pela agricultura globalmente (Hassoun et al., 2022), trazendo ameaças como o aumento das temperaturas, alterações nos padrões climáticos, maior frequência de eventos extremos e mudanças na dinâmica de pragas, comprometendo a segurança alimentar e os meios de subsistência das comunidades agrícolas (Malhi et al., 2021), tornando necessário ações de mitigação e adaptação que amenizem as mudanças climáticas.

Entre as diversas soluções sustentáveis, a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) se destaca como uma estratégia eficaz para a produção de carne, leite, grãos, fibra, energia e produtos florestais na mesma área, por meio de plantio consorciado, sucessão ou rotação de culturas e pecuária (Garrett et al., 2019). O sistema ILPF promove sinergias entre os componentes do agroecossistema, maximizando os ciclos biológicos de plantas e animais, bem como o aproveitamento de resíduos e nutrientes.

Particularmente, esses sistemas têm potencial para reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) ao capturar o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera e armazenar na biomassa em forma de carbono (C), especialmente quando há a presença de árvores (Pezzopane et al., 2021), contribuindo tanto com o armazenamento de C no solo quanto no fuste das árvores, quando essas são usadas para produção de madeira (Oliveira et al., 2024b). As pastagens quando bem manejadas também promovem o sequestro de C. Aproveitar a sinergia entre esses dois componentes nos sistemas integrados é uma estratégia para aumentar o sequestro de C nos sistemas de produção.

Em florestas de eucalipto (*Eucalyptus* spp.), observa-se um incremento médio de carbono (C) estimado em 12 Mg ha^{-1} ano^{-1}, com a maior parcela armazenada na parte aérea (67%), seguido pelas raízes (21%) e pela matéria orgânica do solo (MOS) humificada, que representa os 12% restantes (Carvalho et al., 2010; Paixão et al., 2006).

O solo representa um dos principais reguladores do ciclo do C atmosférico, com implicações diretas nas mudanças climáticas (Minasny et al., 2017). Estima-se que os solos, em escala global, armazenem aproximadamente 2.400 Pg de C, valor cerca de três vezes superior ao conteúdo presente na atmosfera (Crowther et al., 2019). É amplamente reconhecido que o uso e o manejo da terra exercem influência significativa sobre os processos de acúmulo e retenção de C nos solos, além da sua perda, que contribui para o aumento das emissões de C na atmosfera, especialmente em sistemas que promovam a degradação da vegetação e do solo (Oliveira et al., 2020; Sanderman et al., 2017; Xu et al., 2020).

Em contrapartida, o emprego de tecnologias agropecuárias pode incrementar o sequestro de C, mitigar as emissões de GEE, contribuindo para minimizar o aquecimento global e as consequentes mudanças climáticas (Oliveira et al., 2021). Algumas práticas agrícolas podem aumentar a produção das culturas e pastagens e, como consequência, contribuírem para elevar a quantidade de C imobilizado e o teor de matéria orgânica nos solos. Para as pastagens, Segnini et al. (2019) e Oliveira et al. (2021) observaram que as pastagens tropicais bem manejadas funcionam como um dreno de C, sendo capazes de sequestrar C pelo menos até 1 metro de profundi-

dade, após uso de práticas adequadas de manejo do solo, da fisiologia das pastagens e dos animais.

A adoção do ILPF tem demonstrado resultados superiores no sequestro de C no solo em relação a outros sistemas integrados, alcançando taxas médias de 1,21 Mg ha^{-1} ano^{-1}, frente a 1,09 Mg ha^{-1} ano^{-1} em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) (Silva et al., 2024). O maior acúmulo de C no solo em sistemas ILPF se deve principalmente à presença do componente arbóreo, que proporciona maior cobertura vegetal e distribuição do sistema radicular, sendo que 45% a 53% do carbono total até 1 metro está concentrado nos primeiros 30 cm do solo (Oliveira et al., 2024b).

Diante da crescente demanda por sistemas produtivos que conciliem eficiência, resiliência e sustentabilidade, compreender o papel dos sistemas integrados no sequestro de carbono torna-se essencial. Este capítulo visa discutir os mecanismos de acúmulo de carbono associados aos sistemas integrados de produção, considerando seus diferentes compartimentos — biomassa, raízes e solo — e destacando sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas no contexto da agricultura tropical.

11.1.1 Sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste

Na Embrapa Pecuária Sudeste, resumidamente os sistemas estudados incluem diferentes arranjos de integração:

- **ILPF** – integração lavoura-pecuária-floresta, com cultivo rotacionado de milho e pastagem de capim-piatã (*Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã), e árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*, clone GG100) dispostas em fileiras simples (espaçamento 15 × 2 m, posteriormente desbastado para 15 × 4 m);
- **IPF** – integração pecuária-floresta, com capim-piatã e eucalipto no mesmo arranjo, mas sem renovação de pastagem ou consórcio com culturas;
- **ILP** – integração lavoura-pecuária, com consórcio entre milho e capim-piatã, sem presença de árvores;
- **Mata Nativa** – floresta estacional semidecidual (reserva legal), utilizada como referência de vegetação nativa não perturbada;
- **EXT** – sistema extensivo de produção, sob lotação contínua, sem uso de corretivos ou fertilizantes de solo.

No **Capítulo 3**, podem ser observados mais detalhes sobre os sistemas de produção avaliados.

11.2 SEQUESTRO DE C E QUALIDADE DA MOS

11.2.1 Práticas de manejo que influenciam o sequestro de carbono

O sequestro de carbono no solo depende de múltiplos fatores de manejo agrícola e pecuário. Práticas como a cobertura vegetal permanente, o uso de plantio direto, o pastejo adequado da planta forrageira evitando o superpastejo, a adubação adequada, a rotação de cultivos prevendo cobertura morta e evitando o solo exposto, o uso de fertilizantes orgânicos e de bioinsumos podem aumentar significativamente o conteúdo de carbono orgânico no solo, embora sua eficácia varie de acordo com as condições locais e o tipo de solo.

O pastejo rotacionado, ao evitar o superpastejo e permitir a recuperação da vegetação, favorece o acúmulo de biomassa e de resíduos vegetais, elevando o aporte de carbono ao solo. A adubação, especialmente com fertilizantes orgânicos, esterco ou composto, contribui para o aumento do carbono estável, enquanto o uso exclusivo de fertilizantes minerais apresenta efeito menor ou mesmo nulo sobre o sequestro de carbono (Lessmann et al., 2022; Singh et al., 2023; Zheng et al., 2024). A renovação de cultivos, por meio de rotações e incorporação de resíduos, também eleva o carbono, principalmente quando incluem leguminosas ou plantas de cobertura (Singh et al., 2023; Tiefenbacher et al., 2021; Morya et al., 2023).

O uso de bioinsumos como micorrizas, Azospirillum e Pseudomonas pode melhorar a dinâmica microbiana e a formação de agregados, favorecendo a estabilização do carbono no solo, embora a magnitude desse efeito dependa da interação com outros fatores de manejo e das condições ambientais (Zheng et al., 2024).

A cobertura vegetal permanente é um dos fatores mais importantes: protege o solo contra a erosão, mantém o aporte contínuo de resíduos e raízes e reduz a perda de carbono por mineralização. Sistemas com cobertura permanente, como culturas de cobertura ou pastagens bem manejadas e a adoção do plantio direto, apresentam maiores taxas de sequestro de carbono em comparação com solos descobertos ou com pousio frequente (Lessmann et al., 2022; Singh et al., 2023; Bai et al., 2019; Morya et al., 2023).

Para os sistemas integrados de produção a adoção, de pastagens perenes bem manejadas, uso de plantio direto na fase de cultura agrícola, uso de correção e fertilização do solo, uso de conservação do solo e a

introdução de árvores com sistema radicular profundo garantem um cenário estratégico de práticas de manejo agropecuárias promissor para maximizar o sequestro de C. Essas práticas foram adotadas nos sistemas integrados da Embrapa Pecuária Sudeste.

11.2.2 Características produtivas, de manejo e do solo dos sistemas de produção estudados e da vegetação nativa

O carbono armazenado no solo provém principalmente da decomposição de resíduos vegetais e animais, e sua estabilidade depende de fatores como o tipo de uso do solo, a textura e a atividade microbiana (Zhou et al., 2019; Guo; Gifford, 2002; Yu; Song, 2023).

O solo recebe carbono principalmente das raízes, da serapilheira, dos exsudatos radiculares e dos resíduos de colheita. As raízes são especialmente importantes: o carbono proveniente delas permanece mais tempo no solo do que o da biomassa aérea, pois seus compostos e exsudatos alimentam os microrganismos e facilitam a formação de matéria orgânica estável (Rasse et al., 2005; Basile-Doelsch et al., 2020). A serapilheira e os resíduos de colheita aportam carbono mais lábil, enquanto os exsudatos radiculares estimulam a atividade microbiana e a formação de carbono estável (Basile-Doelsch et al., 2020; Witzgall et al., 2021).

A produção primária líquida é um importante indicador da capacidade dos sistemas de produção em aumentar a matéria orgânica dos solos. Pressupõe-se que quanto maior a produção de massa seca dos componentes vegetais, maior é o crescimento do sistema radicular e maior é a possibilidade de deposição de resíduos orgânicos na superfície do solo, e mais quantidade de substrato está disponível para microbiota do solo; todos esses processos irão induzir ao maior acúmulo de matéria orgânica no solo e, como consequência, o maior sequestro de C. No caso das pastagens, ainda há os dejetos dos animais e a senescência de parte do sistema radicular após cada ciclo de pastejo, que contribuem para o aumento da matéria orgânica do solo, e esses processos também são dependentes da produção primária líquida do capim (Oliveira et al., 2021).

O sistema extensivo, pela falta de calagem e fertilização do solo, é um dos sistemas que apresentam o menor acúmulo de massa seca, resultando em menor lotação animal. Os sistemas integrados são uma alternativa para aumentar e diversificar a produção de massa seca dos componentes vegetais, sejam eles a pastagem, a cultura e as árvores. Comparado com os sistemas pecuários pastoris extensivos de produção, os sistemas integrados ainda conseguem aumentar a lotação animal (Tabela 11.1). Por essas razões, os sistemas integrados têm maior potencial de aumento do sequestro de C (Tadini et al., 2021; 2022a; Oliveira et al., 2024b).

11.2.3 Potencial dos sistemas integrados de produção em aumentar o sequestro de C e mitigar as emissões de gases de efeito estufa

Para avaliar o sequestro de C em sistemas integrados de produção, uma área experimental foi montada a partir da conversão de uma área de pastagens extensivas para diferentes sistemas integrados, com avaliações realizadas ao longo do tempo, conforme esquema mostrado na Figura 11.1. Nas épocas de avaliação, amostras de solo foram analisadas para textura, C e densidade aparente em oito camadas de solo em três trincheiras em cada tratamento, e com os resultados; os estoques de C e a taxa de acúmulo de C foram calculadas. Os dados do *Eucalyptus urograndis* do IPF e do ILPF, com 333 árvores.ha^{-1} durante os cinco primeiros anos e 166 árvores.ha^{-1} nos anos subsequentes, foram coletados (árvores com cinco e oito anos de idade) e usados para coletar anéis de madeira e definir o volume de madeira. Foram realizadas análises para definir o teor de C no solo e nas árvores em analisador elementar CHN. Equações para determinar o volume e a massa das árvores e o C pools foram propostas conforme Pezzopane et al. (2021) e Oliveira et al. (2024b) e Figura 11.2.

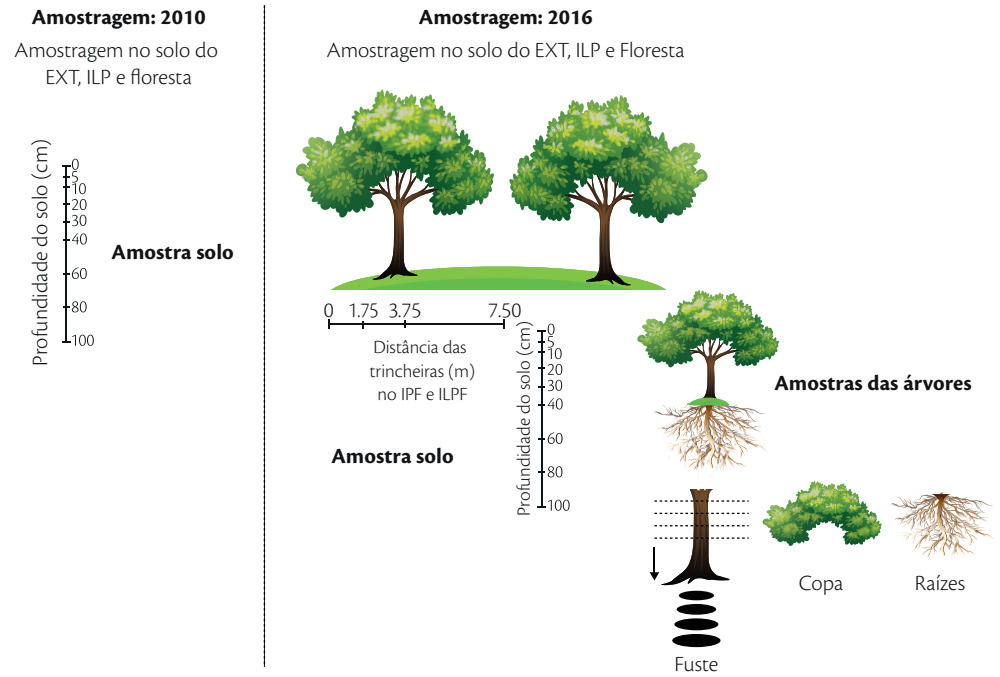
Uma preocupação quanto ao esquema de amostragem dos sistemas integrados de produção é a representação fidedigna dos reais estoques de C existentes na área, especialmente quando existem árvores nos sistemas de produção que não possuem uma ocupação contínua do espaço amostral.

Os estudos da Embrapa Pecuária Sudeste mostram que a arquitetura dos sistemas de produção integrados com árvores influencia espacialmente os parâmetros de solo (Oliveira et al., 2024b). A distância entre os pontos de amostragem (trincheiras) e as linhas das árvores exerce maior influência sobre esses parâmetros em experimentos com menor densidade arbórea (Howlett et al., 2011 com 35 árvores.ha^{-1}), pois promovem maior variabilidade na superfície do solo. Já em sistemas com alta densidade de árvores (Moreira et al., 2018 e o presente estudo Oliveira et al.,

Tabela 11.1. Características produtivas, de manejo e do solo dos sistemas de produção estudados e da vegetação nativa.

Características	Sistemas				
	IPF	ILPF	EXT	ILP	FLO
Pastagem (Massa seca, kg ha^{-1})	7.295,0[1]	9.800,8[1]	4.913,4[1]	6.870,1[5]	–
Taxa de lotação (UA ha^{-1})	2,07[2]	1,84[2]	1,3[2]	1,99[5]	–
Silagem milho (Massa seca, kg ha^{-1})	–	7.541,4[3]	–	6.858,7[5]	–
Madeira (m^3 ha^{-1}) [4]	128,9	140,7	–	–	220,5
Manejo da pastagem	Rotativo	Rotativo	Contínuo	Rotativo	–
Implantação (year)	2011	2011	1994	2005 to 2008	Nativa
Tipo de solo	----------*Typic Haplorthox*----------				
Insumos	Calagem fertilizante	Calagem fertilizante	–	Calagem fertilizante	–
Representatividade Sudeste, somente na Mata Atlântica* (milhões de ha)	0.13	0.16	4.77	1.47	14.44
Ano de coleta amostras para C	2016	2016	2010	2010; 2016	2010
Clima	----------*Humid subtropical climate*----------				

[1] Adaptado de Pezzopane et al. (2020); [2] Unidades animais por hectare por ano; [3] Adaptado de Pezzopane et al. (2019); [4] Adaptado de Pezzopane et al. (2021); [5] Adaptado de Bernardi et al. (2009), onde lotação animal (UA.ha^{-1}) e Pastagem (MS.ha^{-1}) = media ponderada pela área de pastagem e estação climática (6 meses de verão e outono, 1 mês de renovação de pastagem, e 5 meses de primavera e inverno, representando 66,7% da área) e o período de semiconfinamento (representando 33,3% da área) e considerado 2% de ingestão de MS e 70% eficiência de uso da forragem, Milho para silagem (MS, kg ha^{-1}) = matéria original de 2007 a 2009 multiplicada por 32% MS. * A área de cobertura de cada sistema de produção foi obtida pela porcentagem de representação de cada sistema (ILPF em números, 2016) dentro da área total de sistemas integrados para a região Sudeste (Polidoro et al., 2021), ponderando a área de ocupação do Bioma Mata Atlântica dentro da região Sudeste (57,2%, IBGE, 2019). A área coberta pela floresta nativa foi obtida pela porcentagem de representação da Mata Atlântica (57,2%, IBGE, 2019) em relação à área total de floresta nativa da região Sudeste (Mapbiomas, 2022). A cobertura de área de pastagem (EXT) foi obtida pela porcentagem de representação do bioma Mata Altântica (57,2%, IBGE, 2019) na área total de pastagens com baixo vigor na região Sudeste (Mapbiomas, 2022). Traço (–): informação não aplicável.
Fonte: Oliveira et al. (2024b).



EXT: sistema extensivo de produção; ILP: integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta.
Figura 11.1. Esquema de amostragem do solo e das árvores em sistemas integrados de produção.
Fonte: Oliveira et al. (2024b).



Fotos: Patrícia Perondi Anchão Oliveira.

Figura 11.2. Experimentação com sequestro de carbono nos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) da Embrapa Pecuária Sudeste (A-B).

2024b, ambos com 333 árvores.ha^{-1}), observa-se maior uniformidade no solo, atribuída à distribuição mais uniforme do sistema radicular das árvores na área.

A densidade do solo é um fator que interfere no cálculo dos estoques de C, por isso os protocolos para a dinâmica de C do solo recomendam a correção por uma área de vegetação nativa, com solo não perturbado (Fernandes et al., 2014; Fontana et al., 2024). Oliveira et al. (2024b) observaram que na Embrapa Pecuária Sudeste a densidade aparente do solo foi 18% mais alta nos sistemas pecuários de produção (EXT, ILPF, IPF, ILP) do que na floresta, devido aos efeitos da presença de bovinos nos sistemas de produção e ao trânsito de maquinários agrícolas nesses sistemas (Abaye et al., 1997; Muller et al., 2004; Fernández et al., 2015; Oliveira et al., 2024b).

As pastagens bem manejadas com calagem e fertilização e a associação com o milho e o eucalipto no IPF e ILP contribuem para aumentar o teor de C nas camadas superficiais do solo em comparação com o sistema EXT, com pastejo contínuo e sem correção do solo ou fertilização, atingindo em algumas camadas valores semelhantes aos da floresta, mostrando um efeito positivo da melhoria do uso da terra sobre a dinâmica de C em sistemas pecuários integrados, tanto pelo efeito das pastagens (Segnini et al., 2019; Oliveira et al., 2021) quanto da integração com as culturas (Bieluczyk et al., 2020; Tadini et al., 2022a; Oliveira et al., 2024b). Entretanto, quando houve introdução de árvores e culturas no ILPF, o efeito sobre o teor de C foi intermediário entre o EXT e a floresta, muito provavelmente pela maior demanda nutricional do maior número de componentes vegetais cultivados simultaneamente nesse sistema (Bieluczyk et al., 2020; Oliveira et al, 2024b).

Tabela 11.2. Efeito da interação entre sistemas de produção e profundidade do solo para o teor de carbono no solo (%).

Camadas	Tratamentos				
(cm)	FOR	ILPF	IPF	ILP	EXT
0-5	2,51a	2,22b	2,59a	2,58a	1,58c
5-10	1,99a	1,57b	1,83a	2,01a	1,46b
10-20	1,60a	1,27b	1,30b	1,09b	1,14b
20-30	1,35a	1,02b	1,08ab	1,04ab	0,95b
30-40	1,00	0,90	0,89	0,74	1,10
40-60	0,92	0,76	0,73	0,62	0,57
60-80	0,76	0,62	0,64	0,38	0,46
80-100	0,77a	0,63a	0,55a	0,22b	0,30ab

FOR: Floresta estacional semidecidual; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; IPF: integração pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; EXT: sistema extensivo de produção.
Médias seguidas por letras distintas dentro da mesma linha são diferentes entre si ($p \leq 0.05$).
Fonte: Oliveira et al. (2024b).

Nas camadas mais profundas do solo, o teor de C aumentou no ILPF e IPF, ficando próximo aos valores da floresta, com valores mais altos do que os sistemas sem árvores, ILP e semelhantes ao EXT (Tabela 11.2) (Oliveira et al., 2024b). Sarto et al. (2020) mostraram que pastagens apresentaram mais estoques de C4–C na profundidade de 0–0.20 m, enquanto os sistemas integrados com *Eucalyptus* estocaram mais C3–C nas camadas mais profundas (0.60–1.0 m).

O estoque de C no sistema IPF foi igual ao da floresta e maior do que a pastagem EXT; os sistemas ILP e ILPF apresentaram estoques de C intermediários, com o ILP mais próximo do EXT e o ILPF do IPF (Tabela 11.3)

Tabela 11.3. Estoque de C no solo (t.ha^{-1}) em sistemas integrados, em 2016, e em pastagens extensivas, linha de base e floresta nativa em 2010. Estoques corrigidos pela massa de solo, tendo a floresta nativa como área de referência.

Estoques	Tratamentos					Média
	FLO	ILPF	IPF	ILP	EXT	
Estoque C 0-30 cm	60,2	51,62	56,68	54,64	44,62	53,56
Estoque C 0-100 cm	129,66	113,96	118,79	103,52	99,08	113,01
Média	94,94a	82,79bc	87,74ab	79,09bc	71,85c	83,28[4]
EPM[1]	3.585					
P nível[2]						
Tratamento	0,0135					
Camada do solo	<0,0001					
Trat. x Camada[3]	ns					

[1] EPM: Erro-padrão da média; [2] Médias seguidas por letras distintas dentro de uma mesma linha diferem entre si ($p \leq 0.05$); [3] Trat. x Camada: interação entre tratamento *vs.* camada do solo; [4] Média Geral; [ns] Não significativo ($p > 0.05$).
Fonte: Oliveira et al. (2024b).

(Oliveira et al., 2024b). No IPF, o melhor resultado se deve ao sinergismo entre o efeito do incremento de C na superfície das pastagens e do eucalipto em profundidade, conforme observado por Sarto et al. (2020), e provavelmente por um equilíbrio entre a disponibilidade de nutrientes e a demanda nutricional das plantas do sistema, o que pode não ter ocorrido no sistema ILPF (Bieluczyk et al., 2020).

Nos sistemas integrados estudados na Embrapa Pecuária Sudeste, os estoques de C na camada de solo de 0–30 cm foram menores do que na camada de 0–100 cm e representaram entre 45% e 53% do estoque da camada de solo de 0–100 cm, reforçando a importância de avaliar os estoques até 100 cm de profundidade, conforme proposto por Segnini et al. (2019), Oliveira et al. (2020) e Sarto et al. (2020).

No desbaste das árvores de eucalipto dos sistemas de produção da Embrapa Pecuária Sudeste, o teor de C obtido na biomassa do tronco foi de 45,49% (±1.94), e na da raiz foi de 43,27% (±1,15), valores que foram usados para calcular o acúmulo de C na biomassa das árvores (Tabela 11.4). Apesar de o acúmulo de C na biomassa do *Eucalyptus* ser menor do que na floresta nativa, a quantidade é bastante relevante (Tabela 11.4), e no sistema ILPF o acúmulo de C foi maior do que no IPF, fato atribuído à fase de cultura no ILPF por Pezzopane et al. (2021).

Tabela 11.4. Biomassa e C de árvores de *Eucalyptus urograndis* (Clone GG100), com cinco anos de idade (2016), em diferentes sistemas de produção.

Item	Tratamentos[4]		EPM[1]	*P nível*	Referência
	ILPF	IPF		Tratamentos	Floresta
Volume (m^3)	140,72	129,97	2,725	0,0275	–
Biomassa total (kg.ha^{-1})	86.493	78.446	1.852,7	0,0263	162,000
Biomassa da parte aérea (kg.ha^{-1})	73.685	67.022	1.544,3	0,0274	–
Biomassa do tronco (kg.ha^{-1})	61.349	55.725	1.252,8	0,0211	–
Biomassa da copa (kg.ha^{-1})	12.336	10.664	540,02	0,1245	–
Biomassa da raiz (kg.ha^{-1})	12.808	11.424	310,9	0,0224	34,300
C[3] biomassa total (t.ha^{-1})	39,06	35,43	0,836	0,0263	93,2
C biomassa da parte aérea (t.ha^{-1})	33,52	30,49	0,702	0,0274	76,9[2]
C biomassa do tronco (t.ha^{-1})	27,91	25,35	0,570	0,0211	–
C biomassa da copa (t.ha^{-1})	5,61	4,85	0,246	0,1245	–
C biomassa da raiz (t.ha^{-1})	5,54	4,94	0,134	0,0224	16,3

[1] EPM: Erro-padrão da média; [2] soma das árvores, sub-bosque e cipós; [3] *Carbon content in above ground biomass (stem and canopy)* = 45,49% *and carbon content in root* = 43,27%; Traço (–): informação não aplicável.
Fonte: Oliveira et al., 2024b.

A taxa anual de acúmulo de C observada na conversão da floresta para IPF (Floresta → EXT → ILP → IPF) foi de 0,10 t C. ha^{-1}. ano^{-1}, e da floresta para ILPF (Floresta → EXT → ILP → ILPF) foi -0,16 t C. ha^{-1}. ano^{-1} (Tabela 11.5). Nesses processos de conversão EXT → ILP; ILP → IPF; ILP → ILPF, apesar da elevada taxa de acúmulo de C, 0,88; 2,54 e 1,74 t C. ha^{-1}. ano^{-1}, respectivamente, não foi possível compensar a taxa negativa da conversão da Floresta → EXT (-2,55 t C. ha^{-1}. ano^{-1}), porque essa fase durou 12 anos, enquanto a implementação do ILPF e IPF tinha somente seis anos no ano de amostragem.

O sequestro de C realizado no tronco das árvores é outra forma de realizar a mitigação das emissões de gases de efeito estufa dos sistemas integrados de produção (Oliveira et al., 2020). Após o corte das árvores, ao serem transformadas em produtos madeireiros, o C armazenado não é liberado imediatamente, mas apresentam um decaimento de C de acordo com o tipo de produto manufaturado (Pingoud et al., 2006), e esse valor pode ser computado para mitigar as emissões da pecuária nas propriedades rurais que utilizam sistemas pecuários integrados com árvores (Oliveira et al., 2022).

O potencial de mitigação dos gases de efeito estufa (t $CO_{2e.}$. ha^{-1}. ano^{-1}) pelo sequestro anual de C (solo + árvores), incluindo a madeira usada para serraria, é ampliado quando se considera, em adição ao C sequestrado no solo, aquele proveniente das árvores (Tabela 11.6). Considerando a taxa de lotação (Tabela 11.1), a emissão de metano entérico, observada nesses sistemas por Meo-Filho (2022), e a emissão de gases de efeito estufa do solo de Alves (2017), provavelmente o balanço de C do ILPF e IPF poderá gerar créditos de C.

Tabela 11.5. Taxa de acúmulo de C, de acordo com o tipo de conversão de solo realizada.

Tipo de conversão do solo[(1)]	Período (anos)	Taxa anual de sequestro de C
		(t C. ha^{-1}. ano^{-1})
Floresta → EXT → ILP → IPF	1998 a 2016	0,10
Floresta → EXT → ILP → ILPF	1998 a 2016	-0,16
Forest → EXT	1998 a 2010	-2,55
EXT→ ILP	2005 a 2010	0,88
ILP → IPF	2010 a 2016	2,54
ILP → ILPF	2010 a2016	1,74

[(1)] IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; EXT: sistema extensivo de produção.
Fonte: Oliveira et al. (2024b).

11.2.4 Qualidade e estabilidade da matéria orgânica

A matéria orgânica do solo (MOS) é essencial para a fertilidade, estrutura, retenção de água e ciclagem de nutrientes, além de sustentar a microbiota e reduzir impactos ambientais. Em regiões tropicais, onde sua decomposição é acelerada, práticas que aumentem o aporte de resíduos orgânicos e minimizem a perturbação do solo são fundamentais para conservar a MOS e manter a produtividade.

Em relação à estrutura, a MOS contribui para a formação e estabilidade de agregados, o que resulta em solos mais porosos e resistentes à compactação, facilitando o desenvolvimento radicular e a infiltração de água (Meurer et al., 2020; Totsche et al., 2024).

A retenção de água também é beneficiada, pois solos com maior teor de MOS apresentam maior capacidade de armazenar água disponível para as plantas, tornando os sistemas agrícolas mais resilientes a períodos de seca (Ankenbauer; Loheide, 2017; Eden et al., 2017; Lal, 2020).

Tabela 11.6. Potencial de mitigação de gases de efeito estufa (t $CO_{2e.}$. ha^{-1}. ano^{-1}) pelo sequestro anual de C (solo + árvores), incluindo a madeira usada em um cenário de serraria.

Sistema de produção†	Taxa anual de sequestro de C no solo[(1)]	Taxa anual de sequestro de C nas árvores	Taxa anual de sequestro de C (solo + árvores)	Taxa anal de sequestro de C-$CO_{2e.}$[(2)]
	(t C. ha^{-1}. ano^{-1})			t $CO_{2e.}$. ha^{-1}. ano^{-1}
ILPF	-0,16	5,58	5,42	19,89
ILP	0,10	5,07	5,16	18.97

[(1)] ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; ILP: integração lavoura-pecuária; [(2)] Fator de conversão de C para $CO_{2e.}$ = 3,67; C: carbono.
Fonte: Oliveira et al. (2024b).

Além disso, a MOS sustenta uma elevada biodiversidade microbiana e de outros organismos do solo, que desempenham papéis fundamentais na manutenção das funções ecossistêmicas, como a decomposição de resíduos, o controle de patógenos e a promoção da saúde do solo (Delgado-Baquerizo et al., 2025; Romero et al., 2023). Dessa forma, a manutenção e o aumento da MOS são estratégias-chave para a sustentabilidade e resiliência dos agroecossistemas tropicais.

Estudos brasileiros mostram que, em regiões tropicais e semiáridas, a manutenção da MOS em sistemas convencionais é desafiadora. A conversão de vegetação nativa para agricultura ou pastagens pode reduzir em até 16% o carbono orgânico do solo em áreas arenosas, dificultando a recuperação mesmo após décadas. Em sistemas onde se adota o cultivo convencional de culturas agrícolas, as perdas podem chegar a 26% (Medeiros et al., 2020, 2023; Medeiros et al. 2022a, 2022b).

As práticas convencionais, como o preparo intensivo do solo e a baixa adição de resíduos orgânicos, aceleram a decomposição da MOS e reduzem a estabilidade dos agregados do solo, comprometendo a estrutura e a qualidade física do solo ao longo do tempo (Medeiros et al., 2023; Medeiros et al., 2022a). Em solos argilosos, há casos pontuais de aumento de MOS após longos períodos de cultivo, mas essa resposta é exceção e depende fortemente do tipo de solo e das condições climáticas.

Outro desafio é que, mesmo quando há algum aumento de frações particuladas de MOS em pastagens, isso não é suficiente para restaurar os estoques totais de carbono do solo aos níveis originais, quando há manejo inadequado da planta forrageira, com superpastejo ou uso do fogo, ou quando a fertilidade do solo não é corrigida. Entretanto, quando o manejo da planta forrageira é adequado, respeitando-se os aspectos fisiológicos da planta e quando há correção e fertilização do solo, os estoques de C podem aumentar acima dos níveis da vegetação nativa (Segnini et al., 2019; Oliveira et al., 2020; Oliveira et al., 2021; Oliveira et al., 2024b).

Portanto, a adoção de práticas conservacionistas e o manejo adequado são fundamentais para mitigar as perdas e promover a sustentabilidade dos sistemas convencionais brasileiros (Medeiros et al., 2023; Medeiros et al., 2022b).

Os sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta (ILPF) apresentam grande potencial para conservar e estabilizar a MOS em diferentes estágios de transformação (Figura 11.3) em agroecossistemas tropicais. Estudos brasileiros mostram que a integração de culturas, pastagens e árvores favorece o acúmulo e a estabilização do C no solo, promovendo melhorias nos estoques de MOS e na qualidade do solo, especialmente quando comparados a sistemas convencionais ou pastagens extensivas (Tadini et al., 2020; 2021; Matos et al., 2022; Oliveira et al., 2024a; Soares et al., 2024). A diversificação de plantas e o manejo adequado nesses sistemas aumentam o aporte de resíduos orgânicos e favorecem a formação de frações mais estáveis de MOS, contribuindo para a resiliência do solo e mitigação das mudanças climáticas (Tadini et al., 2020; Soares et al., 2024).

No entanto, o sucesso da ILPF depende do manejo correto do sombreamento e da competição entre espécies, pois o excesso de árvores pode reduzir o crescimento de culturas e pastagens, diminuindo o aporte de carbono ao solo (Bessi et al., 2024; Bieluczyk et al., 2020).

De modo geral, a adoção de sistemas ILPF é uma estratégia promissora para intensificar a produção agrícola de forma sustentável, conservando e estabilizando a matéria orgânica do solo nos trópicos brasileiros (Matos et al., 2022; Oliveira et al., 2024a; Soares et al., 2024; Tadini et al., 2020; 2021).

11.2.4.1 Conceitos de qualidade e estabilidade da matéria orgânica do solo

Tradicionalmente, a matéria orgânica do solo (MOS) foi descrita como constituída por macromoléculas complexas, denominadas substâncias húmicas, provenientes da polimerização de compostos orgânicos (Figura 11.4a).

Nesse modelo, a decomposição de compostos orgânicos, como macromoléculas, levava ao aumento da aromaticidade, do tamanho molecular e da reatividade, processo denominado humificação. A transformação da MOS em substâncias húmicas inicia-se com a conversão de resíduos vegetais em compostos mais estáveis, caracterizados por anéis aromáticos e quinonas, ou em estruturas protegidas por associações hidrofóbicas, aumentando sua resistência à decomposição (Liang et al., 2017; De Nobili et al., 2020). Entretanto, recentemente esse modelo vem sendo refutado por uma visão emergente (Dungait et al., 2012; Lehmann; Kleber, 2015; Piccolo, 2016), que propõe que a estabilidade da MOS está associada à formação de moléculas

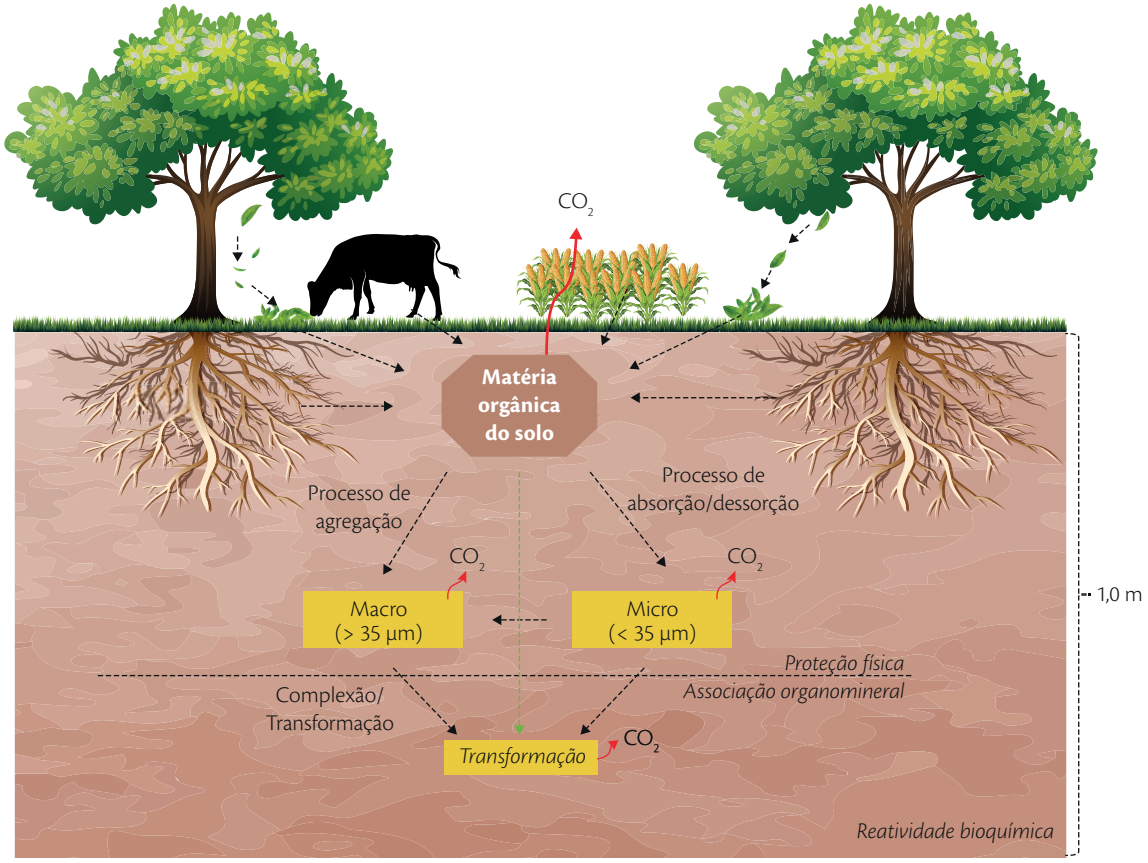


Figura 11.3. Componentes dos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), destacando as diferentes fontes de aporte de matéria orgânica ao solo (MOS), como liteira, exsudatos radiculares de plantas (por exemplo: eucalipto, pastagem e milho) e os dejetos animais, que juntos contribuem para a formação e manutenção da matéria orgânica do solo.

heterogêneas organizadas em estruturas supramoleculares por meio de interações físicas e químicas, nas quais compostos orgânicos interagem com a fração mineral, a água e os microrganismos presentes no solo (4b). Além disso, a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) é determinada pelo teor total, pela composição química e pela funcionalidade, em função da presença de diferentes frações, como ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF), humina (HU), carbono particulado (COP) e carbono associado à fração mineral (COAM).

Essas frações determinam a capacidade da MOS de fornecer nutrientes, melhorar a estrutura do solo e sustentar a atividade biológica, sendo consideradas indicadores sensíveis da qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo agrícola (Carneiro et al., 2025; Silva Júnior et al., 2024; Vicente et al., 2023).

A estabilidade da MOS refere-se à sua resistência à decomposição e à mineralização, estando relacionada à proporção de compostos recalcitrantes (mais estáveis) e lábeis (mais facilmente decompostos) presentes no solo. Solos sob vegetação nativa ou manejos conservacionistas tendem a apresentar maior estabilidade da MOS, com maior presença de frações húmicas e COAM, enquanto sistemas agrícolas convencionais favorecem a perda das frações mais lábeis e a redução da estabilidade (Silva Júnior et al., 2024; Santos et al., 2024a; Vicente et al., 2023).

Entre os principais indicadores de qualidade e estabilidade da MOS, destacam-se a relação C:N, que reflete o equilíbrio entre C e nitrogênio disponível para os microrganismos, as diferentes frações da MOS e atributos estruturais, como a microagregação do solo, que está diretamente relacionada à proteção física da MOS contra a decomposição (Carneiro et al., 2025; Silva Júnior et al., 2024; Vasconcelos et al., 2025; Silva et al., 2022).

A análise dessas frações permite avaliar tanto a quantidade quanto a qualidade da MOS, e frações mais lábeis (COP) indicam maior sensibilidade a

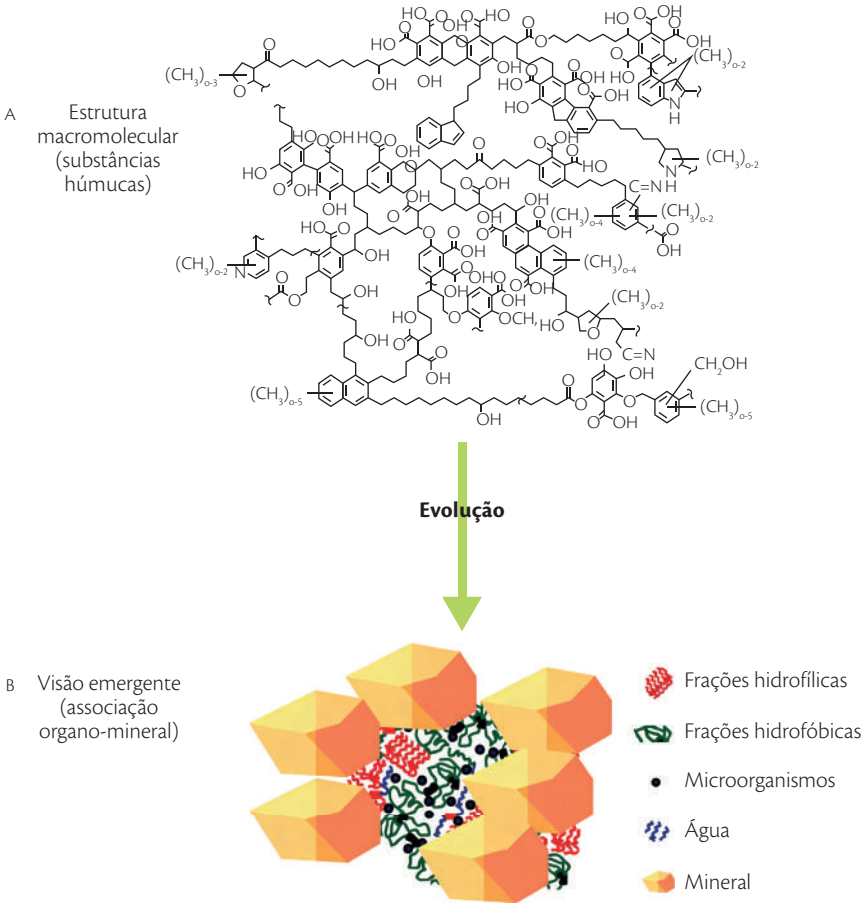


Figura 11.4. Estrutura macromolecular típica das substâncias húmicas, no caso para o ácido húmico (visão tradicional da matéria orgânica do solo – MOS)(A); e Associação organomineral, constituída de moléculas orgânicas de pequena massa molecular mantidas juntas por forças fracas, como ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas, e complexadas com íons metálicos dos minerais do solo, na visão emergente para a estrutura da MOS (B).

mudanças de manejo, enquanto frações recalcitrantes (HU e COAM) refletem maior estabilidade e persistência no solo (Briedis et al., 2021; Santos et al., 2024a; Vicente et al., 2023).

As frações funcionais da MOS incluem o C lábil, que é rapidamente decomposto e serve como fonte imediata de energia para a microbiota; o C recalcitrante, que é mais resistente à decomposição e contribui para a estabilidade a longo prazo; o húmus, composto por AH, AF e HU, que desempenha papel central na retenção de nutrientes e na estruturação do solo; e a biomassa microbiana, que representa a fração viva da MOS e está diretamente envolvida nos processos de ciclagem de nutrientes e manutenção da saúde do solo (Carneiro et al., 2025; Silva Júnior et al., 2024; Vasconcelos et al., 2025). Esses componentes, avaliados em conjunto, fornecem uma visão abrangente da qualidade, estabilidade e funcionalidade da MOS em ambientes tropicais.

11.2.4.2 Mecanismos de estabilização da matéria orgânica

A estabilização da MOS ocorre por mecanismos físicos, químicos e biológicos, além de envolver a dinâmica das frações leve e pesada.

A proteção física da MOS acontece principalmente pela sua inclusão em micro e macroagregados do solo, dificultando o acesso de microrganismos e enzimas à matéria orgânica e, consequentemente, retardando sua decomposição. A formação desses agregados é favorecida por pontes de água e cátions metálicos, que promovem a aglomeração de substâncias húmicas e aumentam a densidade e estabilidade da MOS (Galicia-Andrés et al., 2021). A estabilidade dos agregados está

diretamente relacionada à qualidade física do solo e à proteção da MOS contra os ataques microbianos (Pulido-Moncada et al., 2018).

A estabilização química ocorre principalmente pela associação da MOS com partículas minerais, como argilas e óxidos de ferro e alumínio. Essas interações, muitas vezes mediadas por ligações de hidrogênio e pontes de cátions, formam complexos organominerais que tornam a MOS menos acessível à decomposição microbiana (Galicia-Andrés et al., 2021; Giannetta et al., 2018). A maior parte do C orgânico do solo está presente na fração pesada, associada a minerais, sendo este o principal mecanismo de estabilização em solos tropicais e agrícolas (Freitas et al., 2024a; Giannetta et al., 2018).

A estabilização biológica envolve a transformação da MOS por microrganismos, resultando na formação de compostos recalcitrantes, como o húmus. A necromassa microbiana e seus subprodutos podem se associar a minerais, formando frações mais estáveis de MOS (Manzoni; Cotrufo, 2024). A atividade enzimática e a diversidade microbiana são fundamentais para a conversão de resíduos vegetais em formas mais estáveis de carbono, promovendo a persistência da MOS no solo (Błońska et al., 2021; Manzoni; Cotrufo, 2024).

A MOS pode ser dividida em frações leve (FL), podendo ser fração leve livre (FLL) ou fração leve oclusa (FLO) em agregados e fração pesada (FP), que são associadas a minerais. A FL é composta por compostos mais lábeis e de rápida decomposição, enquanto FP contém compostos mais estáveis e protegidos quimicamente (Giannetta et al., 2018; Li et al., 2022; Sonsri et al., 2024). A dinâmica entre essas frações reflete o equilíbrio entre entrada de resíduos, decomposição e estabilização, e a FP é predominante em solos bem manejados e com maior capacidade de sequestro de C (Freitas et al., 2024; Giannetta et al., 2018; Li et al., 2022).

11.2.4.3 Efeitos dos componentes do Sistema ILPF sobre a MOS

A dinâmica da MOS em sistemas agrícolas é fortemente influenciada pelas práticas de manejo em lavouras, pecuária e florestas, bem como pelas interações entre esses componentes. As diferenças entre camadas superficiais e profundas são claras: na superfície, o carbono é mais jovem, dinâmico e vulnerável a mudanças no uso do solo ou no clima; em profundidade, é mais antigo, estável e menos afetado por perturbações recentes. Além disso, fatores como uso do solo, textura e umidade influenciam a distribuição vertical do carbono (Balesdent et al., 2018; Yu et al., 2019; Wang et al., 2004; Shi et al., 2020).

Na lavoura, a adição de resíduos vegetais, como palhada e raízes, é fundamental para o aporte de C ao solo, especialmente quando associada à rotação de culturas, que diversifica os tipos de resíduos e estimula diferentes comunidades microbianas. O preparo do solo, se excessivo, pode acelerar a decomposição da MOS, mas práticas conservacionistas e a integração com pastagens, como no sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), aumentam o aporte de MOS e favorecem frações mais lábeis e estáveis de C (Bieluczyk et al., 2020; Oliveira Netto et al., 2024).

Na pecuária, o retorno de C ocorre pelas fezes e urina dos animais, além do estímulo ao crescimento, morte e deposição de sistema radicular no solo das pastagens estimulados pelo pastejo (Oliveira et al., 2021). Esse manejo intensivo, quando bem conduzido, eleva o estoque de C e nitrogênio no solo, melhora a fertilidade e estimula a atividade microbiana, promovendo a ciclagem de nutrientes e a estabilidade da MOS (Bieluczyk et al., 2020; Sekaran et al., 2021).

Em florestas, o aporte de serapilheira (folhas, galhos e outros resíduos) e a presença de raízes profundas contribuem para a formação de frações recalcitrantes de C, aumentando a estabilidade da MOS em profundidade e promovendo uma ciclagem eficiente de nutrientes. A diversidade de resíduos e a ausência de distúrbios intensos favorecem a formação de húmus e a manutenção de altos estoques de C (Tadini et al., 2021; Tadini et al., 2022a; Tadini et al., 2022b).

As interações entre lavoura, pecuária e floresta, como nos sistemas integrados (ILPF), geram efeitos sinérgicos sobre a MOS. A alternância de culturas, o pastejo e o componente arbóreo promovem maior aporte e diversidade de resíduos, melhoram a estrutura do solo e aumentam a estabilidade das frações de C, resultando em solos mais férteis, resilientes e sustentáveis (Bieluczyk et al., 2020; Tadini et al., 2021; Tadini et al., 2022a; Tadini et al., 2022b). No entanto, o sucesso desses sistemas depende do manejo adequado, pois o excesso de sombreamento pode reduzir o crescimento de culturas e pastagens, limitando o aporte de carbono ao solo (Bieluczyk et al., 2020).

11.2.4.4 Benefícios do ILPF na qualidade e estabilidade da MOS

Os sistemas (ILPF) promovem benefícios significativos para a qualidade e estabilidade da MOS ao intensificar a diversidade e o aporte contínuo de resíduos orgânicos. A alternância de culturas, pastagens e árvores resulta em maior variedade de resíduos vegetais e radiculares, o que estimula diferentes comunidades microbianas e favorece a ciclagem de nutrientes, aumentando a resiliência do solo (Bieluczyk et al., 2020; Soares et al., 2024). Esse aporte contínuo de carbono, proveniente de múltiplas origens (culturas, pastagens, árvores), contribui para o acúmulo de C tanto nas frações lábeis quanto nas frações mais estáveis da MOS (Cavalieri-Polizeli et al., 2024; Oliveira et al., 2023; Ferreira et al., 2024; Soares et al., 2024).

A melhoria na estrutura do solo e na formação de agregados é outro benefício marcante do ILPF. A presença constante de resíduos e raízes promove a agregação do solo, aumentando a estabilidade dos agregados e protegendo fisicamente a MOS contra a decomposição acelerada (Cavalieri-Polizeli et al., 2024; Oliveira et al., 2023; Ferreira et al., 2024). Isso resulta em solos com maior porosidade, melhor retenção de água e maior resistência à erosão, características essenciais para a sustentabilidade agrícola a longo prazo (Cavalieri-Polizeli et al., 2024; Matos et al., 2022).

Além disso, o ILPF contribui para a redução da mineralização excessiva da MOS, pois a diversidade de resíduos e a presença de diferentes fontes de C favorecem a formação de frações mais recalcitrantes e aumentam a eficiência do uso do C pelos microrganismos, reduzindo as perdas por emissão de CO_2 (Bessi et al., 2024; Soares et al., 2024). Como consequência, há um incremento significativo no C das frações estáveis do solo, especialmente nas frações particuladas e mineral associadas, que são fundamentais para a manutenção da fertilidade e da estabilidade do solo em sistemas tropicais (Cavalieri-Polizeli et al., 2024; Oliveira et al., 2023; Ferreira et al., 2024; Soares et al., 2024).

Esses benefícios tornam o ILPF uma estratégia promissora para a intensificação sustentável da produção agrícola, promovendo a conservação e a estabilidade da matéria orgânica do solo e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Pesquisas brasileiras mostram que sistemas ILPF acumulam mais C no solo do que os convencionais, especialmente nas linhas de árvores e nas camadas superficiais, promovendo maior sequestro de carbono, melhorando a qualidade física do solo e favorecendo a sustentabilidade e a mitigação das mudanças climáticas. A maior parte desse carbono está em frações estáveis (96–97%) e tende a aumentar com o tempo de adoção do sistema (Matos et al., 2025).

11.2.4.5 Métodos de avaliação da qualidade e estabilidade da MOS

O fracionamento do carbono do solo consiste em separar suas diferentes formas conforme a estabilidade e a origem: carbono particulado (mais lábil), carbono associado a minerais (mais estável) e necromassa microbiana. Essa análise é essencial para compreender quais frações são mais vulneráveis à perda e quais contribuem para o sequestro de longo prazo (Yang et al., 2025; Basile-Doelsch et al., 2020; Manzoni; Cotrufo, 2024).

Existem alguns métodos de avaliação da qualidade e estabilidade da MOS, como o C total, C da biomassa microbiana, fracionamento físico e químico da MOS, índice de labilidade, estabilidade e humificação, além de técnicas emergentes, como a ressonância magnética nuclear (RMN), pirose, espectroscopia (Tadini et al., 2021; Tadini et al., 2022a; Tadini et al., 2022b; Santos et al., 2024b).

De forma geral o C total é avaliado por análise elementar, e a estabilidade da matéria orgânica é estimada por métodos como razão C/N. A biomassa microbiana á avaliada através da técnica medido por fumigação com clorofórmio, micro-ondas ou radiação, que quantificam o carbono liberado após a lise dos microrganismos.

Outros métodos utilizados para verificar quantitativamente o estoque de C nas frações do solo são o fracionamento físico, em que é utilizado um dispersante, posteriormente o peneiramento úmido e separação para isolar a matéria orgânica particulada (POM) e a matéria orgânica associada a minerais (MAOM), permitindo identificar frações mais lábeis e mais estáveis do C do solo (Cambardella; Elliott, 1992).

Já o fracionamento químico é realizado através de reações químicas utilizando soluções como hipoclorito de sódio (NaOCl) e ácido fluorídrico (HF), permitindo separar as frações de C em diferentes graus de estabilidade, isolando pools ativos, lentos e passivos da MOS, além de estudar a resistência da MOS à decomposição e sua função no sequestro de C (Sleutel et al., 2009).

Esses métodos ajudam a entender como o C é protegido e transformado no solo, sendo essenciais para pesquisas sobre qualidade e manejo do solo.

Tadini et al. (2021) estudaram os sistemas de produção da Embrapa Pecuária Sudeste, caracterizados na Tabela 11.1 quanto aos estoques de C e qualidade da MOS, e enfatizaram que, apesar de o teor de C ser o principal indicador do sequestro de C no solo, os aspectos estruturais da MOS são muito importantes também, pois possuem uma função estratégica na estabilidade química dos componentes e no tempo de vida dos compostos de C no solo. O uso da espectroscopia de fluorescência induzida por laser (LIFS) é uma técnica efetiva e prática para avaliar o índice de humificação da MOS (HLIFS), sendo muito útil em sistemas de pastagens (Segnini et al., 2019) e sistemas integrados (Tadini et al., 2021). Nas áreas da Embrapa Pecuária Sudeste, os HLIFS foram decrescentes na seguinte ordem: ILP > EXT > INT > IPF > ILPF > Floresta, classificando MOS por LIFS como mais estável quimicamente nos sistemas de produção integrados do que na floresta (Figura 11.5), provavelmente por possuir mais grupos aromáticos condensados. MOS com grupos mais recalcitrantes normalmente tem maior longa vida no solo.

Observa-se que o sistema ILPF, apesar de ter maiores conteúdos de carbono que a área nativa (NF), tem também maior HLIFS, indicando intensa atividade biológica no solo e habilidade para transformar mais rapidamente a entrada mais recente de material orgânico no solo. O sistema ILP tem um HLIFS mais intenso de todos os sistemas, mas neste caso explicado pelo menor conteúdo de carbono no solo, especialmente em profundidade, ou seja, não teve entrada de material orgânico recente na mesma intensidade que os sistemas ILPF e IPF, que contam com o componente arbóreo.

11.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de sistemas pastoris integrados de produção pecuária (ILP, IPF e ILPF) se mostra uma alternativa estratégica de intensificação sustentável para a agropecuária brasileira, promovendo relevante acúmulo e estabilização do carbono tanto no solo quanto na biomassa arbórea, frente a sistemas convencionais e pastagens degradadas. Os dados obtidos nas expe-

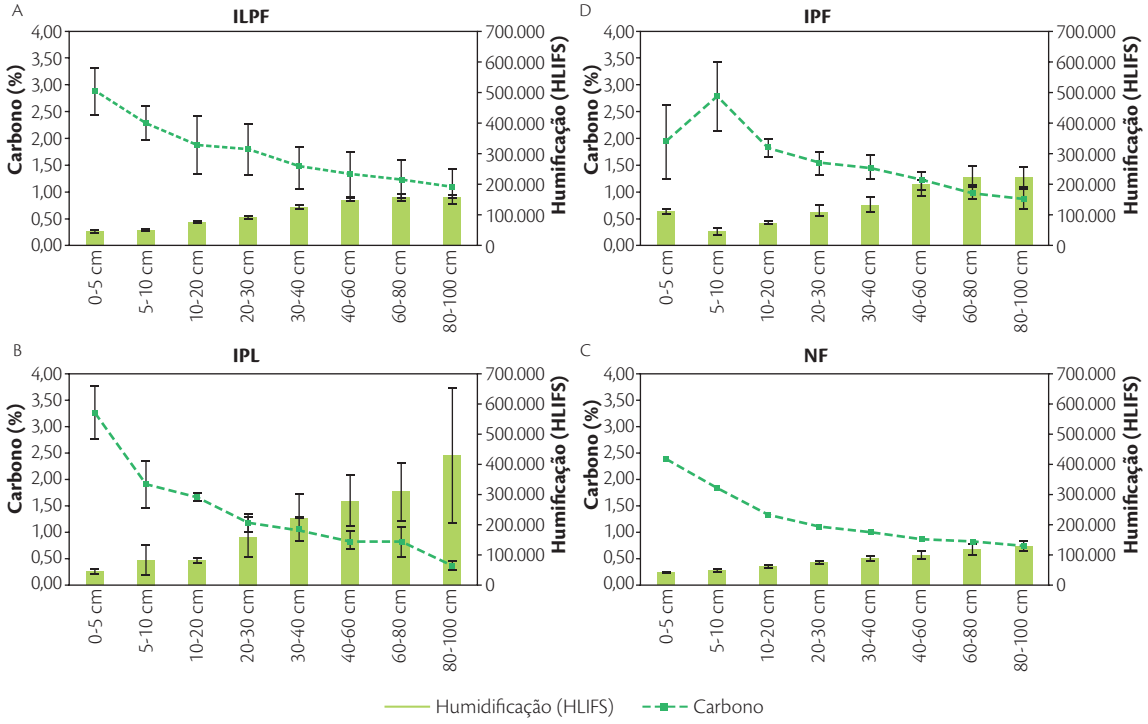


Figura 11.5. Medidas do índice de humificação obtido por fluorescência induzida por laser (HLIFS), e conteúdo de carbono das amostras de solos para os diferentes sistemas integrados: integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (A); integração pecuária-floresta (IPF) (B); integração lavoura-pecuária (ILP) (C); área nativa – referência (NF) (D).

rimentações da Embrapa Pecuária Sudeste evidenciam que o componente arbóreo tem papel-chave no incremento e distribuição do carbono nas camadas mais profundas do solo, além de proporcionar benefícios ecossistêmicos associados à melhoria da estrutura, fertilidade e resiliência do solo.

A comparação entre os sistemas estudados demonstra que o IPF se assemelha ao remanescente florestal em termos de estoque de carbono, enquanto o ILPF e o ILP apresentam estoques intermediários, superiores ao sistema extensivo e compatíveis com práticas de conservação do solo do sistema pecuário pastoril intensivo. Ressalta-se que o sucesso dessa estratégia depende de um conjunto de práticas de manejo conservacionistas, como calagem, adubação, plantio direto, manejo adequado da planta forrageira e controle de lotação animal, além da correta escolha de espécies de plantas e seus arranjos espaciais.

Assim, os sistemas integrados (ILP, IPF, ILPF) representam ferramenta essencial para potencializar o sequestro de carbono e contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura tropical, integrando ganhos de produtividade e conservação ambiental. Investimentos em pesquisa de longo prazo e políticas públicas de incentivo à adoção desses sistemas são fundamentais para ampliar seus impactos positivos, fortalecer a segurança alimentar e alinhar a produção rural às metas de sustentabilidade global.

11.4 REFERÊNCIAS

ABAYE, A. O.; ALLEN, V.; FONTENOT, J. Grazing sheep and cattle together or separately: effect on soil and plants. **Agronomy Journal**, v. 89, n. 3, p. 380-386, 1997. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900030003x.

ALVES, M. G. O. **Dinâmica dos gases de efeito estufa do sistema solo-planta em sistemas de integração**. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Produtividade Animal) – Universidade de São Paulo, Pirassununga. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74131/tde-13122017-104152/. Acesso em: 20 ago. 2025.

ANKENBAUER, K. J.; LOHEIDE, S. P. The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 4, p. 891-901, 2017. DOI: http://doi.org/10.1002/hyp.11070.

BAI, X.; HUANG, Y.; REN, W.; COYNE, M.; JACINTHE, P. A.; TAO, B.; HUI, D.; YANG, J.; MATOCHA, C. Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 25, n. 8, p. 2591-2606, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/gcb.14658.

BALESDENT, J.; BASILE-DOELSCH, I.; CHADOEUF, J.; CORNU, S.; DERRIEN, D.; FEKIACOVA, Z.; HATTÉ, C. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 599-602, 2018. DOI: http://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3.

BASILE-DOELSCH, I.; BALESDENT, J.; PELLERIN, S. Reviews and syntheses: the mechanisms underlying carbon storage in soil. 2020. DOI: http://doi.org/10.5194/bg-17-5223-2020

BERNARDI, A. C. C.; ESTEVES, S. N.; BARBOSA, P. F.; VINHOLIS, M. de M. B. Renovação de pastagem e terminação de bovinos em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos, SP: resultados de 3 anos de avaliações. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009. 28 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 24). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPPSE-2010/19149/1/PROCIBolPesDesACCB2009.00413.pdf

BESSI, D.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; TANAKA, M. O. Decomposition and stabilization of the organic matter in integrated livestock production systems. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2275-2292, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01044-0.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; DE MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; DE CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 371, n. 15, p. 114368, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368.

BŁOŃSKA, E.; PIASZCZYK, W.; STASZEL, K.; LASOTA, J. Enzymatic activity of soils and soil organic matter stabilization as an effect of components released from the decomposition of litter. **Applied Soil Ecology**, v. 157, p. 103723, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103723.

BRIEDIS, C.; BALDOCK, J.; MORAES SÁ, J. C.; SANTOS, J. B.; MCGOWAN, J.; MILORI, D. M. B. P. Organic carbon pools and organic matter chemical composition in response to different land uses in southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 3, p. 1083-1100, 2021. DOI: http://doi.org/10.1111/ejss.12972.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

CARNEIRO, R. G.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. C. Soil organic fractions and biological soil health indicators to assess conventional and organic vegetable production systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Use and Management**, v. 41, n. 2, p. e70066, 2025. DOI: http://doi.org/10.1111/sum.70066.

CARVALHO, J. L. N. C.; AVANZI JUNIOR, C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-289, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001.

CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; GUEDES FILHO, O.; ROMANOSKI, V. S.; RUTHES, B. E. S.; CALÁBRIA, Z. P.; OLIVEIRA, L. B.

Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality. **Soil & Tillage Research**, v. 242, p. 106143, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2024.106143.

CROWTHER, T. W.; VAN DEN HOOGEN, J.; WAN, J.; MAYES, M. A.; KEISER, A. D.; MO, L.; AVERILL, C.; MAYNARD, D. S. The global soil community and its influence on biogeochemistry. **Science**, v. 365, n. 6455, p. eaav0550, 2019. DOI: http://doi.org/10.1126/science.aav0550.

DE NOBILI, M.; BRAVO, C.; CHEN, Y. The spontaneous secondary synthesis of soil organic matter components: a critical examination of the soil continuum model theory. Applied Soil Ecology, v. 154, 103655, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103655.

DELGADO-BAQUERIZO, M.; ELDRIDGE, D. J.; LIU, Y. -R.; LIU, Z. -W.; COLEINE, C.; TRIVEDI, P. Soil biodiversity and function under global change. **PLoS Biology**, v. 23, n. 3, p. e3003093, 2025. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pbio.3003093.

DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; GREGORY, A. S.; WHITMORE, A. P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, v. 18, p. 1781-1796, 2012. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x.

EDEN, M.; GERKE, H. H.; HOUOT, S. Organic waste recycling in agriculture and related effects on soil water retention and plant available water: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, n. 2, p. 1-21, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/s13593-017-0419-9.

FERNANDES, F.; FERNANDES, A. H. B. M.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; BODDEY, R. M.; OLIVEIRA, P. P. A. **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da Rede de Pesquisa Pecus**. São Carlos: Embrapa Southeast Livestock, 2014. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 116). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1006926/protocolo-para-quantificacao-dos-estoques-de-carbono-do-solo-da-rede-de-pesquisa-pecus. Acesso em: 20 ago. 2025.

FERNÁNDEZ, P. L.; ALVAREZ, C. R.; TABOADA, M. A. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop–livestock systems of Argentina. **Soil & Tillage Research**, v. 153, p. 86-94, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2015.05.008.

FERREIRA, C. D. S.; TAVARES, R. L. M.; PAIVA FILHO, S. V. D.; CANTÃO, V. C. G.; SIMON, G. A.; ALVES, J. M.; NASCIMENTO, H. L. B. D.; BILEGO, U. O. Stock of carbon and soil organic fractions in no-tillage and crop livestock integration systems. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 3025, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/su16073025.

FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. C.; SALTON, J. C.; TOMAZI, M.; DE ALMEIDA, R. G.; DE ARAUJO, A. R.; ZANATTA, J. A.; OLIVEIRA, P. P. A. Coleta de amostras do solo na agricultura de baixo carbono. In: FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. C. (ed.). **Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. p. 9-19. (Embrapa Solos. Documentos, 243). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169849/1/Coleta-de-amostras-do-solo-na-agricultura-de-baixo-carbono-2024.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025.

FREITAS, V. S.; BABOS, D. V.; GUEDES, W. N.; SILVA, F. P.; TOZO, M. L. L.; DE ANDRADE, C. A.; VILLAS BOAS, P. R.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L. Soil organic matter dynamics and soil carbon stocks from tropical and sub-tropical areas under no-till: an on-farm research. **Catena**, v. 247, n. 108491, p. 1-13, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108491.

GALICIA-ANDRÉS, E.; ESCALONA, Y.; OOSTENBRINK, C.; TUNEGA, D.; GERZABEK, M. H. Soil organic matter stabilization at molecular scale: The role of metal cations and hydrogen bonds. **Geoderma**, v. 401, p. 115237, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115237.

GARRETT, R. D.; GIL, J. D. B.; VALENTIM, J. F. Transferência de tecnologia: desafios e oportunidades para Adoção de ILPF na Amazônia brasileira legal. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2019. cap. 36, p. 599-615. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1112650/1/26865.pdf Acesso em: 20 ago. 2025.

GIANNETTA, B.; PLAZA, C.; VISCHETTI, C.; COTRUFO, M. F.; ZACCONE, C. Distribution and thermal stability of physically and chemically protected organic matter fractions in soils across different ecosystems. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, n. 5, p. 671-681, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s00374-018-1290-9.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002. DOI: http://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.

HASSOUN, A.; BOUKID, F.; PASQUALONE, A.; BRYANT, C. J.; GARCÍA, G. G.; PARRA-LÓPEZ, C.; JAGTAP, S.; TROLLMAN, H.; CROPOTOVA, J.; BARBA, F. J. Emerging trends in the agri-food sector: digitalisation and shift to plant-based diets. **Current Research in Food Science**, v. 5, p. 2261-2269, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.11.010.

HOWLETT, D. S.; MORENO, G.; LOSADA, M. R. M.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D. Soil carbon storage as influenced by tree cover in the Dehesa cork oak silvopasture of central-western Spain. Journal of Environmental Monitoring, v. 13, p. 1897-1904, 2011. DOI: https://doi.org/10.1039/c1em10059a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250 000. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 168 p. (Relatórios metodológicos, v. 45). Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf

LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020. DOI: http://doi.org/10.1002/agj2.20282.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, p. 60-68, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/nature16069.

LESSMANN, M.; ROS, G. H.; YOUNG, M. D.; DE VRIES, W. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management. **Global Change Biology**,

v. 28, n. 3, p. 1162-1177, 2022. DOI: http://doi.org/10.1111/gcb.15954.

LI, X.; YANG, T.; HICKS, L. C.; HU, B.; LIU, X.; WEI, D.; WANG, Z.; BAOJUAN, W. Latitudinal patterns of light and heavy organic matter fractions in arid and semi-arid soils. **Catena**, v. 215, p. 106293, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106293.

LIANG, C.; SCHIMEL, J.; JASTROW, J. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. **Nature Microbiology**, v. 2, 17105, 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105.

MAPBIOMAS. **Plataforma MapBiomas Brasil**. 2022. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/

MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1-21, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/su13031318.

MANZONI, S.; COTRUFO, M. F. Mechanisms of soil organic carbon and nitrogen stabilization in mineral-associated organic matter - insights from modeling in phase space. **Biogeosciences**, v. 21, n. 18, p. 4077-4098, 2024. DOI: http://doi.org/10.5194/bg-21-4077-2024.

MATOS, A. M. S.; BONINI, C. S. B.; MOREIRA, B. R. A.; ANDREOTTI, M.; HEINRICHS, R.; SILVA, D. T.; SOUZA, J. A. L.; SANTOS, M. A.; ANDRIGHETTO, C.; PAVAN, G.M.; BARRETO, V. C. M.; BONINI NETO, A. Long-term integrated crop–livestock–forestry systems recover the structural quality of ultisol soil. **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 2961, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12122961.

MATOS, P. S.; OLIVEIRA, J. M.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E.; DA SILVEIRA, A. L. R.; DAMIAN, J. M.; MORAES, P. A. O.; DE ARAUJO, W. A.; SIQUEIRA, M. M. B.; DA SILVA, R. R.; FERRARESI, T. M.; STONE, L. F.; DA SILVA, M. A. S.; FREITAS, F. M. C.; PACHECO, A. R.; YELUPIRATI, J.; ALMEIDA, P. L. O. Impact of land use intensification on key drivers of soil organic carbon pools in Brazil's Central-West. **Catena**, v. 249, p. 108636, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108636.

MEDEIROS, A. S.; GONZAGA, B. M.; DA SILVA, T. S.; BARRETO, B. S.; DOS SANTOS, T. C.; DE MELO, P. L. A.; GOMES, T. C. A.; MAIA, S. M. F. Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma Regional**, v. 33, n. e00647, p. e00647, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647.

MEDEIROS, A. S.; MAIA, S. M. F.; SANTOS, T. C.; GOMES, T. C. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287, p. 106690, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690.

MEDEIROS, A. S.; SOARES, A. A. S.; MAIA, S. M. F. Soil Carbon stocks and compartments of organic matter under conventional systems in Brazilian semi-arid region. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 3, p. 697-710, 2022a. DOI: http://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n321rc.

MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; MAIA, S. M. F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 219, p. 105336, 2022b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2022.105336.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest biome? **Agronomy**, v. 12, 2738, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

MEURER, K. H. E.; CHENU, C.; COUCHENEY, E.; HERRMANN, A. M.; KELLER, T.; KÄTTERER, T.; NIMBLAD SVENSSON, D.; JARVIS, N. Modelling dynamic interactions between soil structure and the storage and turnover of soil organic matter. **Biogeosciences**, v. 17, n. 20, p. 5025-5042, 2020. DOI: http://doi.org/10.5194/bg-17-5025-2020.

MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A.; ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; CHAPLOT, V.; CHEN, Z.; CHENG, K.; DAS, B. S.; FIELD, D. J.; GIMONA, A.; HEDLEY, C. B.; HONG, S. Y.; MANDA, M.; MARCHANT, B. P.; MARTIN, M.; MCCONKEY, B. G.; MULDER, V. L.; O'ROURKE, S.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; ODEH, I.; PADARIAN, J.; PAUSTIAN, K.; PAN, G.; POGGIO, L.; SAVIN, I.; STOLBOVOY, V.; STOCKMANN, U.; SULAEMAN, Y.; TSUI, S.; VÅGEN, T.; VAN WESEMAEL, B.; WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59-86, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002.

MOREIRA, G. M.; NEVES, J. C. L.; MAGALHÃES, C. A. de S.; FARIAS NETO, A. L. de; SAUER, G.; SILVA, J. F. V.; FERNANDES, R. B. A. Soil chemical attributes in response to tree distance and sun-exposed faces after the implantation of an integrated crop-livestock-forestry system. **Revista Árvore**, v. 42, n. 4, e420405, 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400005.

MORYA, R.; BHARGAVA, A.; LALITHA, G. R.; VAMSHI, M.; VERMA, S.; RASTOGI, M.; RAJ, S. Soil management practices to enhance carbon sequestration rates: a review. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n. 11, p. 3762-3776, 2023. DOI: http://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113556.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MITJA, D. The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian Amazon: a case study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 103, n. 2, p. 279-288, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.003.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; ALVES, T. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SAKAMOTO, L. S.; HERNIQUE, F. L.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). **Animal**, v. 14, n. 3, p. 427-437, 2020. DOI: http://doi.org/10.1017/S1751731120001822.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; ALVES, T. C.; LEMES, A. P.; OLIVEIRA, B. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and mitigation of pasture-based dairy production systems in the Brazilian Atlantic Forest biome. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, 958751, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fvets.2022.958751.

OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M.; PRAES, M. F. F. M.; PEDROSO, A. F.; OLIVEIRA, B. A.; SPERANÇA, M. A.; BOSI, C.;

FERNANDES, F. A. Soil carbon dynamics in Brazilian Atlantic Forest converted into pasture-based dairy production systems. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1136-1149, 2021. DOI: http://doi.org/10.1002/agj2.20578.

OLIVEIRA, G. F.; MAFRA, A. L.; CORREA, J. C.; HENTZ, P.; CECHETTO, M. Application of organic and mineral fertilizers increases carbon fractions in two classes of aggregates in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0220044, 2023. DOI: http://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220044.

OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H. M.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: a review. **Geoderma Regional**, v. 37, p. e00796, 2024a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; JÚNIOR, F. P.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic Forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, p. 127219, 2024b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219.

OLIVEIRA NETTO, A. J. J. G. F.; FAGUNDES L. M.; PINTO L. A. S. R.; TROGELLO E.; PEREIRA M. G. Cropping and soil management systems effects on soil organic matter fractions in diversified agricultural fields in the Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0240017, 2024c. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240017.

PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L. D.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. D. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 411-420, 2006. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-67622006000300011.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agricola**, v. 77, e20180150, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 39-49, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PICCOLO, A. In memoriam Prof. F. J. Stevenson and the question of humic substances in soil. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 3, 23, 2016. DOI: https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2.

PINGOUD, K.; SKOG, K. E.; MARTINO, D. L.; TONOSAKI, M.; XIAOQUAN, Z. Harvest wood products. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (ed.). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. cap. 12.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L. de; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. A. R.; CESÁRIO, F. V.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 12, p. 3457-3468, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.3876.

PULIDO-MONCADA, M.; LOZANO, Z.; DELGADO, M.; DUMON, M.; VAN RANST, E.; LOBO, D.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W. M. Using soil organic matter fractions as indicators of soil physical quality. **Soil Use and Management**, v. 34, n. 2, p. 187-196, 2018. DOI: http://doi.org/10.1111/sum.12414.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, v. 269, n. 1–2, p. 341-356, 2005. DOI: http://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y.

ROMERO, F.; HILFIKER, S.; EDLINGER, A.; HELD, A.; HARTMAN, K.; LABOUYRIE, M.; VAN DER HEIJDEN, M. G. Soil microbial biodiversity promotes crop productivity and agro-ecosystem functioning in experimental microcosms. **The Science of the Total Environment**, v. 885, p. 163683, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163683.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 36, p. 9575-9580, 2017. DOI: http://doi.org/10.1073/pnas.1706103114.

SANTOS, S. R.; COSTA, L. M.; SOUZA, C. M. M.; LEAL, G. P. L.; MELLO, D. C.; SILVA, W. T. L.; CAMÊLO, D. L.; SCHAEFER, C. E. G. R. Thermodegradation of organic matter in soils of different mineral composition in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 37, n. e00798, p. e00798, 2024a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00798.

SANTOS, J. V.; GORANOV, A. I.; BENTO, L. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; SÁ, I. P.; NOGUEIRA, A. R. A.; MARTIN-NETO, L.; HATCHER, P. G. Biogeochemistry of dissolved organic matter and inorganic solutes in soil profiles of tropical pasturelands. **Soil & Tillage Research**, v. 240, p. 106100, 2024b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2024.106100.

SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; SARTO, J. R. W.; RICE, C. W.; ROSOLEM, C. A. Deep soil carbon stock, origin, and root interaction in a tropical integrated crop–livestock system. Agroforestry Systems, v. 94, p. 1865-1877, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-020-00505-6.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; PRAES, M. F. F. M.; RODRIGUES, P. H. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock

and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. Scientia Agricola, v. 76, p. 33-40, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0131.

SEKARAN, U.; KUMAR, S.; GONZALEZ-HERNANDEZ, J. L. Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. **Geoderma**, v. 381, p. 114686, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114686.

SHI, Z.; ALLISON, S. D.; HE, Y.; LEVINE, P. A.; HOYT, A. M.; BEEM-MILLER, J.; ZHU, Q.; WIEDER, W. R.; TRUMBORE, S.; RANDERSON, J. T. The age distribution of global soil carbon inferred from radiocarbon measurements. **Nature Geoscience**, v. 13, n. 8, p. 555-559, 2020. DOI: http://doi.org/10.1038/s41561-020-0596-z.

SILVA JÚNIOR, J.; WENDLING, B.; TORRES, J. L. R.; NICCHIO, B.; LEMES, E. M. Carbon stock and chemical fractionation of organic matter in different soil management systems in the Bahian Cerrado. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 22, p. 3562-3581, 2024. DOI: http://doi.org/10.1080/00103624.2024.2402803.

SILVA, J. F. D.; GONTIJO NETO, M. M.; SILVA, G. F. D.; BORGHI, E.; CALONEGO, J. C. Soil organic matter and aggregate stability in soybean, maize and urochloa production systems in a very clayey soil of the Brazilian Savanna. **Agronomy**, v. 12, n. 7, p. 1652, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12071652.

SILVA, L. J.; OLIVEIRA, D. M.; SANTOS, R. S.; OLIVEIRA, P. A.; FREITAS, D. A.; CHERUBIM, M. R.; CERRI, C. Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: a meta-analysis. **Geoderma Regional**, v. 36, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00761.

SINGH, P.; NAZIR, G.; DHERI, G. S. Influence of different management practices on carbon sequestration of agricultural soils–a review. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 12, p. 2471-2492, 2023. DOI: http://doi.org/10.1080/03650340.2022.2158326.

SLEUTEL, S.; LEINWEBER, P.; BEGUM, S. A.; KADER, M. A.; NEVE, S. Shifts in soil organic matter composition following treatment with sodium hypochlorite and hydrofluoric acid. **Geoderma**, v. 149, n. 3–4, p. 257-266, 2009. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.004.

SOARES, S.; SOUZA, W.; HOMEM, B.; RAMALHO, I.; BORRÉ, J.; PEREIRA, M.; PINHEIRO, É.; MARCHAO, R.; ALVES, B.; BODDEY, R.; URQUIAGA, S. The use of integrated crop–livestock systems as a strategy to improve soil organic matter in the Brazilian Cerrado. **Agronomy**, v. 14, n. 11, p. 2547, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy14112547.

SONSRI, K.; MITSUBOSHI, M.; WATANABE, A. Stabilization mechanisms of organic matter in Andosols under long-term fertilization as revealed from structural, molecular, and stable isotopic signatures. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, n. 1, p. 47-59, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s11368-023-03626-4.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MARTIN NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; BERNARDI, A. C. C. Integrated crop-livestock-forest systems: soil carbon sequestration and organic matter stabilization as detected by laser based spectroscopies. In: EGU GENERAL ASSEMBLY, 2020, Vienna. **Abstracts** [...]. Vienna: European Geosciences Union, 2020.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN-NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil & Tillage Research**, v. 211, n. e105001, p. 105001, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2021.105001.

TADINI, A. M.; MARTIN NETO, L.; GORANOV, A. I.; MILORI, D. M. B. P.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; COLNAGO, L. A.; HATCHER, P. G. Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13136, 2022a. DOI: http://doi.org/10.1111/ejss.13136.

TADINI, A. M.; BERNARDI, A. C. C.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MARTIN-NETO, L. Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. **Geoderma Regional**, v. 28, n. e00476, p. e00476, 2022b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00476.

TIEFENBACHER, A.; SANDÉN, T.; HASLMAYR, H. P.; MILOCZKI, J.; WENZEL, W.; SPIEGEL, H. Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 882, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy11050882.

TOTSCHE, K. U.; RAY, N.; KÖGEL-KNABNER, I. Structure–function co-evolution during pedogenesis—Microaggregate development and turnover in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 187, n. 1, p. 5-16, 2024. DOI: http://doi.org/10.1002/jpln.202400012.

VASCONCELOS, G. X. M.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; XAVIER, A. L.; BANDEIRA, D. J. C.; GOMES, D. V. O. Organic fractions, microbial biomass carbon, and their interrelationships with structural attributes in different land uses. **Engenharia Agrícola**, v. 45, n. 1, p. e20240189, 2025. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v45nespe120240189/2025.

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; ALEIXO, S.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; ANDRADE, G. R. P. Chemical composition of organic carbon in aggregate density fractions under cacao agroforestry systems in South Bahia, Brazil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 1, p. 1-15, 2023. DOI: http://doi.org/10.1007/s42729-022-01083-5.

WANG, S.; HUANG, M.; SHAO, X.; MICKLER, R. A.; LI, K.; JI, J. Vertical distribution of soil organic carbon in China. **Environmental Management**, v. 33, n. 1, 2004. DOI: http://doi.org/10.1007/s00267-003-9130-5.

WITZGALL, K.; VIDAL, A.; SCHUBERT, D. I.; HÖSCHEN, C.; SCHWEIZER, S. A.; BUEGGER, F.; POUTEAU, V.; CHENU, C.; MUELLER, C. W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 4115, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8.

XU, X.; PEI, J.; XU, Y.; WANG, J. Soil organic carbon depletion in global Mollisols regions and restoration by management practices: a review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 3, p. 1173-1181, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s11368-019-02557-3.

YANG, Y.; GUNINA, A.; CHENG, H.; LIU, L.; WANG, B.; DOU, Y.; WANG, Y.; LIANG, C.; AN, S.; CHANG, S. X. Unlocking mechanisms for soil organic matter accumulation: carbon use efficiency and microbial necromass as the keys. **Global Change Biology**, v. 31, n. 1, p. e70033, 2025. DOI: http://doi.org/10.1111/gcb.70033.

YU, H.; ZHA, T.; ZHANG, X.; MA, L. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China. **The Science of the Total Environment**, v. 693, n. 25, p. 133632, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133632.

YU, H.; SONG, W. Research progress on the impact of land use change on soil carbon sequestration. **Land**, v. 12, n. 1, p. 213, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/land12010213.

ZHENG, H.; XU, Y.; WANG, M.; QI, L.; LIAN, Z.; HU, L.; HU, H.; MA, B.; LV, X. the role of fertilization on soil carbon sequestration in bibliometric analysis. **Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 1850, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture14101850.

ZHOU, Y.; HARTEMINK, A. E.; SHI, Z.; LIANG, Z.; LU, Y. Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China. **The Science of the Total Environment**, v. 647, p. 1230-1238, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.016.

Capítulo 12

Viabilidade Econômica

Marcela de Mello Brandão Vinholis, Estella Rosseto Janusckiewicz, Alberto Carlos de Campos Bernardi, José Ricardo Macedo Pezzopane, Patrícia Perondi Anchão Oliveira, Hildo Meirelles de Sousa Filho, Rolando Pasquini Neto



RESUMO: O objetivo deste capítulo foi avaliar e comparar a viabilidade econômica de diferentes sistemas de produção agropecuária por meio da Taxa Interna de Retorno (TIR), do Valor Presente Líquido (VPL) e do Payback simples. Os sistemas de produção avaliados foram: (i) pecuária extensiva (SE); (ii) pecuária intensiva (SI); (iii) integração lavoura-pecuária (ILP); (iv) integração pecuária-floresta (IPF); e (v) integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) com milho para silagem, bovinos de corte em engorda e eucalipto. Para cada sistema, simulou-se um projeto 100 ha, com fluxo de caixa de 14 anos e com eficientes técnicos estabelecidos para o município de São Carlos-SP, Brasil. Os indicadores foram calculados para fluxos de caixa com preços das safras 2024/2025 (preços pecuários maiores) e 2023/2024 (preços pecuários menores), permitindo comparar dois períodos economicamente distintos. Adicionalmente, avaliou-se o efeito de um preço premium associado a uma eventual certificação para Carne Carbono Neutro (CCN). Para os preços da safra 2024/2025, os resultados indicaram: a ILP seria o sistema economicamente mais atrativo; a IPF, ILPF e SI seriam viáveis economicamente. Para preços da safra 2023/2024: os sistemas integrados mantiveram-se viáveis economicamente; e os SI e SE ficaram inviáveis economicamente. A inclusão do preço premium para CCN na IPF e na ILPF tornou esses sistemas mais atrativos economicamente.
Palavras-chave: Viabilidade Econômica; Sistemas Integrados de Produção Agropecuários; Pecuária de Corte; Carne Carbono Neutro; Indicadores Financeiros.

ABSTRACT: The objective of this chapter was to evaluate and compare the economic viability of different agricultural production systems using the Internal Rate of Return (IRR), Net Present Value (NPV), and simple payback. The production systems evaluated were: (i) extensive livestock farming (SE); (ii) intensive livestock farming (SI); (iii) crop-livestock integration (ILP); (iv) livestock-forestry integration (IPF); and (v) crop-livestock-forestry

https://doi.org/10.4322/9786586819427-12

integration (ILPF) with corn for silage, beef cattle for fattening, and eucalyptus. For each system, a 100 ha project was simulated, with a 14-year cash flow and established technical efficiency for the municipality of São Carlos-SP, Brazil. The indicators were calculated using cash flows from the 2024/2025 (higher livestock prices) and 2023/2024 (lower livestock prices) crop seasons, allowing for a comparison of two economically distinct periods. Additionally, the effect of a premium price associated with potential certification for C-Neutral Beef was evaluated. For the 2024/2025 crop season prices, the results showed: ILP (integrated crop-livestock) was the most economically attractive system; IPF (integrated livestock-forestry), ILPF (integrated crop-livestock-forestry) and SI (intensive livestock farming) was economically viable; SE (extensive livestock farmin) was the least economically attractive, despite the lower initial investments. For the 2023/2024 crop season, the integrated systems remained economically viable, while the SI (Integrated System) and SE became economically unviable. The inclusion of the premium price for C-Neutral Beef in IPF and ILPF made these systems more economically attractive.

Keywords: Economic Viability; Integrated Agricultural Production Systems; Beef Cattle; C-Neutral Meat; Financial Indicators.

12.1 INTRODUÇÃO

Entre as estratégias estimuladas pelo plano ABC+ no Brasil (Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), está a adoção e manutenção de sistemas agropecuários conservacionistas e sustentáveis de produção, com o intuito de aumento da produtividade, da renda, da resiliência e da mitigação de gases de efeito estufa (Brasil, 2021). Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta podem ser capazes de alcançar esses objetivos (Meo-Filho et al., 2022; Aranha et al., 2022; Agethen et al., 2024; Peri et al., 2024). No entanto, a decisão de adotá-los depende da avaliação que os produtores fazem quanto à sua viabilidade econômica.

Este capítulo tem como objetivo contribuir com o tema ao apresentar um estudo de viabilidade econômica de cinco sistemas de produção simulados com coeficientes obtidos para o município de São Carlos, São Paulo, Brasil. Foram construídos fluxos de caixa e estimados indicadores de viabilidade econômica para os seguintes sistemas: (i) sistema de produção pecuária extensiva (SE); (ii) sistema de produção pecuária intensiva (SI); (iii) sistema de integração lavoura-pecuária (ILP); (iv) sistema de integração pecuária-floresta (IPF); e (v) sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF). As análises que serão apresentadas nas próximas seções, incluindo algumas reflexões sobre vantagens e desvantagens dos sistemas, têm o objetivo de contribuir no processo de decisão dos produtores a respeito dessas opções tecnológicas.

12.2 INDICADORES ECONÔMICOS

Os indicadores de viabilidade econômica que serão calculados neste estudo são a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL) e o Payback simples, conforme definidos na Tabela 12.1. O cálculo desses indicadores foi realizado a partir de um fluxo de caixa projetado para 14 anos. O fluxo de caixa compreende as entradas e as saídas de recursos financeiros. As entradas referem-se aos valores obtidos com a venda dos produtos pecuários, agrícolas e silvícolas, enquanto as saídas se referem às despesas com insumos agropecuários, mão de obra, maquinário, implementos, benfeitorias, dentre outros. Os investimentos em benfeitorias, maquinário e implementos foram considerados no ano zero, enquanto os seus valores residuais foram atribuídos no último ano do fluxo de caixa. Do primeiro ao 14º ano foram contabilizados os custos com manutenção de benfeitorias, maquinário e implementos, custos com mão de obra, insumos agrícolas, insumos para pecuária e outras despesas (como energia e despesas administrativas).

Os coeficientes técnicos relacionados à produção animal, produção agrícola e produção silvícola são resultados de experimentações na fazenda Canchim, Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, Brasil (Meo-Filho et al., 2022; Brunetti et al., 2025). Esses coeficientes experimentais foram utilizados na simulação de cinco projetos de investimento, uma para cada sistema de produção, sempre considerando 100 hectares para cada projeto/sistema. A estrutura de mão de obra, benfeitorias, máquinas e implementos foram adaptados para a mesma escala de produção. Os nomes dos coeficientes técnicos utilizados e suas respectivas unidades de medida estão apresentados nas Tabelas 12.2 e 12.3. Adicionalmente, foram coletados preços de insumos e produtos nos sites do Instituto de Economia Agrícola (IEA/SP), da Scot Consultoria, do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

Tabela 12.1. Indicadores econômicos.

Indicador econômico	Descrição	Critério de avaliação
Taxa Interna de Retorno (TIR)*	É a taxa que faz com que o valor presente de todos os fluxos de caixa do projeto seja igual a zero	TIR > Taxa de desconto: projeto é viável TIR < Taxa de desconto: projeto é inviável TIR = Taxa de desconto: projeto é indiferente, a decisão pode considerar outros fatores não financeiros
Valor Presente Líquido (VPL)**	Calcula o valor presente dos fluxos de caixa futuros descontados a uma taxa de juros apropriada (também conhecida como taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade), menos o custo do investimento inicial	VPL > 0: projeto é rentável VPL < 0: o projeto não é rentável VPL = 0: projeto cobre os custos e remunera o capital à taxa de desconto definida
Payback simples*	Mostra quanto tempo leva para recuperar o valor investido no projeto	Menor tempo para retornar investimento

*Fonte: Adaptado de Arco-Verde e Amaro (2014); **Adaptado de Silva e Fontes (2005).

Tabela 12.2. Coeficientes técnicos utilizados nos cálculos das entradas e saídas de cada item dos fluxos de caixa dos sistemas SE, SI, ILP, IPF e ILPF.

Pecuária (SE, SI, ILP, IPF e ILPF)	**Unidade/ano**
Taxa de lotação	UA/ha
Duração do período de permanência no pasto	dias
Peso vivo de entrada no pasto	kg/animal
Ganho de peso médio	kg/animal/dia
Rendimento de carcaça	%
Tempo de fornecimento de sal mineral e proteinado	dias
Consumo sal mineral e proteinado	kg/animal/dia
Quantidade de vermifugações e aplicações de carrapaticida/animal	dose/animal
Quantidade de vermífugo e carrapaticida aplicada/dose	mL/kg animal/dose
Quantidade de vacinas aplicadas por animal (Excel 10 e raiva)	dose/animal
Quantidade de vacina dose (Excel 10 e raiva)	mL/kg animal/dose
Quantidade de corretivos e fertilizantes (manutenção dos pastos)	t/ha
Consumo de combustível	L/ha
Quantidade de sementes, corretivos e fertilizantes (reforma dos pastos – SE, SI)	kg/ha, t/ha
Lavoura (sistemas ILP, IPF e ILPF)	**Unidade/ano**
Produção de milho	t MV/ha
Quantidade de sementes de milho	kg/ha
Quantidade de insumos (herbicida, sementes, corretivos e fertilizantes)	L/ha, t/ha
Consumo de combustível	L/ha
Floresta (sistemas IPF e ILPF)	**Unidade/ano**
Volume de madeira em cada corte (<17, 18-25, 25-35 e >35 cm)	m^3/ha
Quantidade de mudas de eucalipto	mudas/ha
Quantidade de insumos (gel hidropônico, defensivos e fertilizantes)	kg/ha, L/ha, t/ha
Quantidade de desramas	diária/ha
Consumo de combustível	L/ha

ILP: integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; SE: pecuária extensiva; SI: pecuária intensiva.

Tabela 12.3. Coeficientes técnicos utilizados nos cálculos das saídas para itens comuns nos fluxos de caixa dos sistemas SE, SI, ILP, IPF e ILPF.

Itens de custo e investimentos	Unidade/ano
Mão de obra – mensalistas e veterinário	mês, diária
Consumo de energia para cerca elétrica (exceto no extensivo)	kWh
Quantidade de cavalos	nº
Consumo de ração dos cavalos	sacos/animal
Quantidade vacina Tri Equi	dose/animal
Benfeitorias – cerca elétrica e paraguaia	km/ha
Benfeitorias – bebedouro, curral e reservatório de água	unidade
Benfeitorias – cocho	m/cabeça
Trator 85 ou 132 CV	unidade
Colhedora de forragem (sistemas integrados)	unidade
Distribuidor de calcário e adubo (sistemas integrados e intensivo)	unidade
Grade niveladora, carreta agrícola e roçadeira	unidade
Pulverizador de barra, plantadeira e motopoda (sistemas integrados)	unidade
Lâmina traseira (plaina)	unidade
Despesas administrativas	%
Uso de filtros e lubrificantes	%
Manutenção de benfeitorias, maquinários e implementos	%

ILP: integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; SE: pecuária extensiva; SI: pecuária intensiva.

(Cepea, Esalq/USP) e do Departamento de Economia Rural (Deral/PR). Os preços foram coletados para dois momentos econômicos distintos: o ano agropecuário 2023/2024 e o ano agropecuário 2024/2025. Quando não existentes, os preços foram coletados em estabelecimentos comerciais da região do estudo. A partir dos valores dos coeficientes técnicos e dos preços, foi possível calcular os valores monetários das saídas e das entradas do fluxo de caixa. A taxa de desconto utilizada como referência para avaliação da TIR e do VPL foi a taxa de juros real em agosto de 2025 (9,28% ao ano), calculada a partir da taxa Selic.

12.3 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Foram analisados cinco sistemas de produção, sendo dois sistemas apenas com a atividade de produção pecuária (um com manejo extensivo e baixo nível tecnológico e outro com manejo intensivo baseado na fertilização da pastagem e pastejo rotacionado) e três sistemas de produção integrada (lavoura-pecuária, pecuária-floresta, lavoura-pecuária-floresta). A Figura 12.1 resume a ocupação do solo em cada sistema de produção no período de 14 anos. No sistema ILP, uma gleba de 33,3% da área de 100 ha foi cultivada anualmente com milho para silagem. Nos sistemas IPF e ILPF, o componente arbóreo foi implantado de forma gradual, em três etapas, sendo 33,3% da área por ano. No sistema IPF, no primeiro ano após o plantio das árvores, ocorreu consórcio com a produção de milho; enquanto no sistema ILPF esse consórcio ocorreu por dois anos consecutivos.

No sistema de **pecuária solteira com manejo extensivo (SE)**, composta pela espécie forrageira *Urochloa (syn. Brachiaria) decumbens* Stapf cv. Basilisk, metade do perímetro total das pastagens foi reformada no ano zero e a outra metade no sétimo ano, com a correção de macro e micronutrientes (calcário dolomítico, 2,0 t ha^{-1}), superfosfato simples (0,3 t ha^{-1}) e fertilização nitrogenada (20-05-20, 0,3 t ha^{-1}).

No sistema de **pecuária solteira com manejo intensivo (SI)**, composta pela espécie forrageira *Urochloa (syn. Brachiaria) brizantha* (Hochst ex. A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã, o perímetro total de área de pastagem foi reformado no ano zero, com a correção de macro e micronutrientes (calcário dolomítico, 2,0 t ha^{-1}),

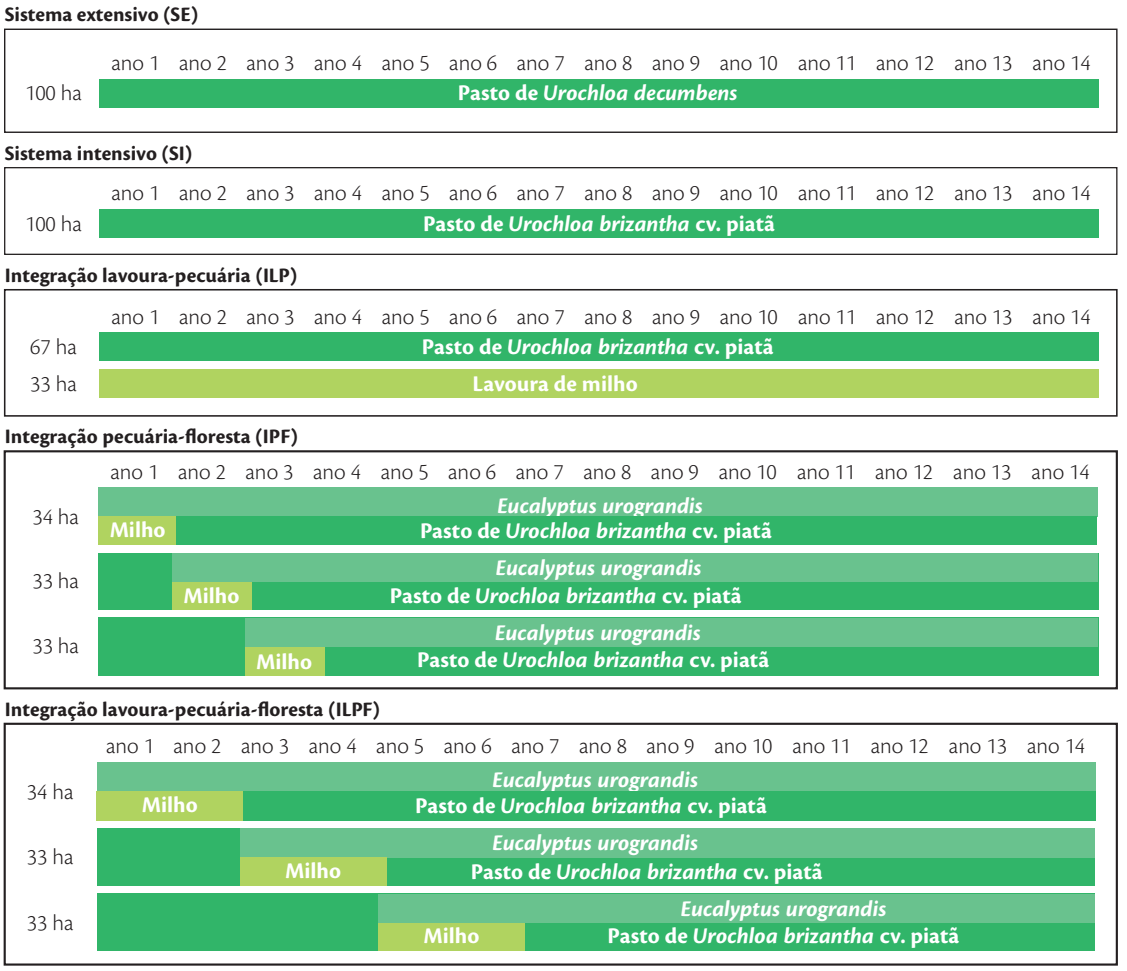


Figura 12.1. Uso do solo nos sistemas pecuária extensiva (SE), pecuária intensiva (SI), integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

superfosfato simples (0,4 t ha^{-1}) e cloreto de potássio (0,1 t ha^{-1}) e, posteriormente, realizada a manutenção trienal dos pastos com correção de macro e micronutrientes (calcário dolomítico, 2,0 t ha^{-1}) e superfosfato simples (0,5 t ha^{-1}) e manutenção anual com fertilização nitrogenada (0,4 t ha^{-1}).

No **sistema ILP**, composto pela espécie forrageira *Urochloa (syn. Brachiaria) brizantha* (Hochst ex. A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã, anualmente uma gleba de 33,3% do perímetro total da área foi reformada, com a correção de macro e micronutrientes (calcário dolomítico, 2,0 t ha^{-1}) e fertilização nitrogenada de implantação (08-28-16, 0,5 t ha^{-1}) e manutenção (20-05-20, 0,6 t ha^{-1}) para a cultivar de milho (*Zea Mays* L. var. DKR 390 PRO 2) para a produção de silagem; enquanto a outra gleba de 66,7% da área total foi recuperada, com fertilização nitrogenada (0,4 t ha^{-1}).

No **sistema IPF**, composto pela espécie forrageira *Urochloa (syn. Brachiaria) brizantha* (Hochst ex. A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã, inicialmente, uma gleba de 33,3% do perímetro total da área foi reformada anualmente até atingir a totalidade (ano três), com a correção de macro e micronutrientes (calcário dolomítico, 2,0 t ha^{-1}) e fertilização nitrogenada de implantação (08-28-16, 0,5 t ha^{-1}) e manutenção (20-05-20, 0,6 t ha^{-1}) para a cultivar de milho (*Zea Mays* L. var. DKR 390 PRO 2) para a produção de silagem e favorecer a implantação gradual da espécie arbórea (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) no sistema; enquanto as outras glebas de 66,7% (ano um) e 33,3% (ano dois) da área total foram recuperadas, respectivamente, com fertilização nitrogenada (0,4 t ha^{-1}). Para a implantação do componente arbóreo, foram aplicados os fertilizantes nitrogenados de plantio (04-30-10, sulfato de zinco, FTE BR12 e super-

fosfato simples, com 33,3, 10,0, 3,3 e 75,0 kg ha^{-1}, respectivamente); enquanto para manutenção, após um ano de implantação para cada gleba (20-05-20, 0,1 t ha^{-1}).

No **sistema ILPF**, composto pela espécie forrageira *Urochloa (syn. Brachiaria) brizantha* (Hochst ex. A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã, inicialmente, o mesmo procedimento que o sistema IPF foi realizado, reformando anualmente uma gleba de 33,3% do perímetro total da área por dois anos consecutivos até atingir a totalidade da área (ano seis), com a correção de macro e micronutrientes (calcário dolomítico, 2,0 t ha^{-1}) e fertilização nitrogenada de implantação (08-28-16, 0,5 t ha^{-1}) e manutenção (20-05-20, 0,6 t ha^{-1}) para o consórcio da cultivar de milho (*Zea Mays* L. var. DKR 390 PRO 2) para a produção de silagem, seguido pelo favorecimento da implantação da espécie arbórea (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) no sistema; enquanto anualmente as outras glebas de 66,7% (ano três) e 33,3% (ano cinco) da área total foram recuperadas, respectivamente, com fertilização nitrogenada (0,4 t ha^{-1}). Para a implantação bienal do componente arbóreo, foram aplicados os fertilizantes nitrogenados de plantio (04-30-10, sulfato de zinco, FTE BR12 e superfosfato simples, com 33,3, 10,0, 3,3 e 75,0 kg ha-1, respectivamente); enquanto para manutenção, após um ano de implantação para cada gleba (20-05-20, 0,1 t ha-1).

O componente florestal nos sistemas IPF e ILPF foi implantado em fileiras simples, com espaçamento de 15x2 m, na orientação leste-oeste e densidade de 333 árvores/ha. O desbaste das árvores ocorreu aos 5 e 8 anos, e o corte final ocorreu aos 12 anos. Todos os sistemas de produção receberam novilhos Nelore e Canchim [5/8 Charolês (Bos taurus) + 3/8 Nelore] em terminação. Os animais foram suplementados com sal mineral *ad libitum* e com suplementação proteica durante a época das secas. O protocolo sanitário de vacinação e vermifugação utilizado foi recomendado para a região de estudo.

A Tabela 12.4 apresenta os valores dos coeficientes técnicos principais para os cinco sistemas de produção.

Os fluxos de caixa e os indicadores de viabilidade econômica foram calculados por meio do software computacional Microsoft Excel™ para dois cenários de preços: preços para a safra 2024/2025 (ano de preços mais elevados) e preços para a safra 2023/2024 (ano de preços mais baixos). Adicionalmente, simulou-se um fluxo de caixa considerando um preço *premium* a ser pago pela CCN. O prêmio considerado foi de 2,5% do valor de mercado da arroba do boi gordo (Pereira et al., 2019) em sistemas integrados com o componente arbóreo (IPF e ILPF). Os resultados para esses cenários estão descritos a seguir.

12.3.1 Indicadores econômicos obtidos na safra 2024/2025 (cenário de preços altos)

Os preços dos produtos considerados nos fluxos de caixa dos sistemas analisados estavam relativamente elevados no ano agrícola 2024/2025, notada-

Tabela 12.4. Coeficientes técnicos agronômicos, zootécnicos e florestais utilizados na simulação dos fluxos de caixas dos sistemas SE, SI, ILP, IPF e ILPF.

Coeficiente técnico	Sistemas de produção				
(unidade/por ano)	**SE**	**SI**	**ILP**	**IPF**	**ILPF**
Taxa de lotação (UA/ha)	1,30	2,34	2,13	2,11	2,04
Período de permanência no pasto (dias)	365	365	365	365	365
Peso vivo de entrada (kg/animal)	285	285	285	285	285
Ganho de peso médio (kg/dia/animal)	0,46	0,53	0,52	0,48	0,45
Rendimento de carcaça (%)	53	56	56	56	55
Produção de milho (t MV/ha)	–	–	43,3	40,5	40,5
Produção de madeira (m^3/ha) – 1º corte	–	–	–	64,45	64,45
Produção de madeira (m^3/ha) – 2º corte	–	–	–	76,17	76,17
Produção de madeira (m^3/ha) – 3º corte	–	–	–	160,07	160,07

Traço (–): informação não aplicável; ILP: Integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; SE: pecuária extensiva; SI: pecuária intensiva.
Fonte: Adaptado de Meo-Filho et al. (2022) e Brunetti et al. (2025).

mente o boi gordo (Figura 12.2), o que sinalizaria a obtenção de indicadores de viabilidade econômica elevados. Foi a partir desse cenário que se procedeu uma primeira análise.

A evolução do fluxo líquido de caixa simulado para cada sistema de produção, considerando esse cenário de preços elevados, pode ser observado na Figura 12.3. O ano zero apresenta valores negativos em todos os sistemas de produção, devido aos investimentos em benfeitorias, maquinários e implementos. Os sistemas integrados apresentam investimentos iniciais maiores em razão principalmente da aquisição máquinas e implementos para o cultivo agrícola e implantação das árvores. Todos os sistemas tiveram investimentos em cerca paraguaia, bebedouro, cocho coberto, curral, reservatório de água, distribuidor de calcário e adubo, grade niveladora, carreta agrícola, roçadeira e plaina. Com exceção do sistema extensivo, os demais sistemas de produção tiveram gastos com cerca elétrica. Nos sistemas integrados, considerou-se a aquisição de um trator de 132 CV, uma colhedora de forragem e uma motopoda (nos sistemas arbóreos). Nos sistemas exclusivos, considerou-se a aquisição de um trator de 85 CV.

Os sistemas IPF e ILPF apresentaram os maiores valores de investimento inicial (com média de R$ 1.152 mil), seguido pelo ILP (com R$ 1.110 mil), pelo SI (com R$ 895 mil), e, por fim, pelo SE (com R$ 788 mil).

O sistema ILP apresentou fluxo líquido de caixa positivo e superior aos demais sistemas de produção do primeiro ao sétimo ano. Esse resultado deveu-

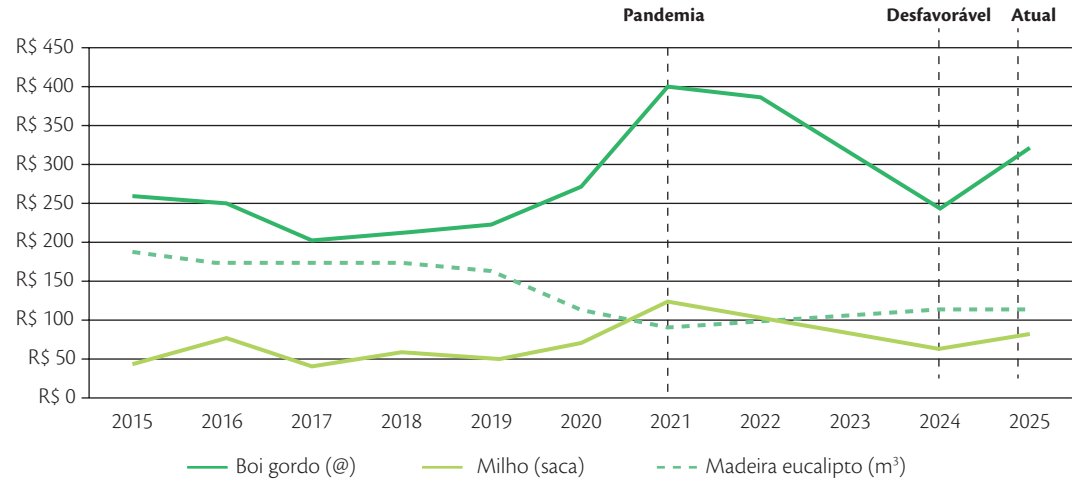


Figura 12.2. Preços do boi gordo (@), do milho (saca) e da madeira de eucalipto (m³), de 2015 a 2025, corrigidos pelo IPCA.

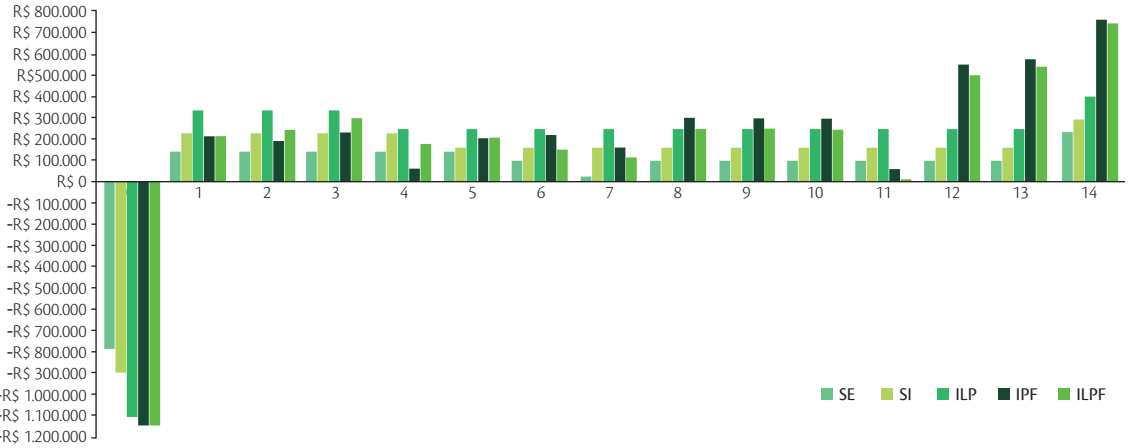


Figura 12.3. Fluxo de caixa líquido, preços da safra 2024/2025, nos sistemas pecuária extensiva (SE), pecuária intensiva (SI), integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

-se, em grande medida, à maior produção de milho (43,3 t MV/ha) e à maior taxa de lotação dos pastos (2,13 UA/ha) quando comparados aos demais sistemas integrados. Os principais custos operacionais de produção do sistema ILP foram com aquisição de garrotes (55,7%) e corretivos/fertilizantes (23,1%).

Os sistemas integrados com árvores apresentaram fluxos líquidos de caixa superiores nos anos de corte de árvores, particularmente no segundo desbaste do 8º ao 10º ano e no corte final do 12º ao 14º ano. A receita obtida com o corte das árvores é relevante para o resultado econômico dos sistemas integrados (Pontes et al., 2021; Reis et al., 2023). Se, por um lado, o retorno econômico ocorre no longo prazo, por outro, Ansolin et al. (2022) argumentam que o componente florestal oferece uma estratégia de diversificação da produção com flexibilidade para as negociações, visto que o produtor pode optar por adiar o corte se os preços estiverem desfavoráveis.

Nos demais anos, os sistemas com árvores apresentaram fluxo líquido de caixa inferior ao sistema ILP e, em alguns anos, inferior ao sistema intensivo, particularmente o sistema IPF. Os sistemas IPF e ILPF apresentaram taxas de lotação ligeiramente inferiores (2,11 UA/ha e 2,04 UA/ha, respectivamente) às dos sistemas ILP e intensivo (2,13 UA/ha e 2,34 UA/ha, respectivamente). Taxas de lotação menores em sistemas integrados são comuns. Trivelin (2018), por exemplo, observou taxa de lotação menor em sistema agrossilvipastoril com árvores de eucalipto mais adensadas (1,79 UA/ha) do que em sistema com densidade menor de árvores (2,18 UA/ha) e em sistema ILP (2,28 UA/ha). Aranha (2016) observou redução da produção de massa de forragem conforme a densidade de árvores aumentou, resultando em menor taxa de lotação.

No sistema IPF, o maior custo de produção foi com aquisição de garrotes, que variou entre 50,2% e 68,4% dos custos totais anuais, seguido por corretivos/fertilizantes, que variou de 15,9% a 24,7%. No sistema ILPF, o maior custo de produção foi também com a compra de garrotes (variando de 40,1% a 68,3% dos custos totais no ano), seguido por corretivos/fertilizantes (variação de 16,0% a 32,5%).

A Tabela 12.5 apresenta os indicadores econômicos calculados para os sistemas de produção investigados, considerando os preços da safra 2024/2025. Observa-se que o sistema ILP apresenta-se mais atrativo. A TIR alcançou um valor próximo de 26%, enquanto o VPL foi de R$ 10.638,00/ha, e o retorno do investimento esteve próximo aos três anos. Uma das vantagens do sistema ILP foi a diversificação da produção com atividades de ciclo mais curto que a pecuária e capazes de gerar receitas anuais, como a produção de milho e a pecuária de engorda, resultando em um fluxo líquido relativamente mais estável e de maior valor. Este resultado é corroborado por Calil e Ribera (2024).

A pecuária de engorda no sistema com manejo intensivo (SI) apresentou indicadores um pouco inferiores ao sistema ILP. Ainda assim, seus indicadores mostraram que o sistema é economicamente atrativo. A TIR alcançou um valor próximo a 21%, o VPL foi de R$ 6.173,00/ha e o retorno do investimento esteve próximo a quatro anos. Esses resultados podem ser atribuídos, em grande medida, à taxa de lotação média mais elevada (2,34 UA/ha) e a uma receita anual relativamente alta. Entretanto, vale ressaltar que os sistemas de pecuária solteira geram resultados econômicos mais suscetíveis às variações de preços da pecuária, o que reduz a estabilidade do fluxo líquido, algo que claramente pode ocorrer no sistema extensivo. A aquisição de garrotes nesse sistema representou 71% do custo total anual. Esse elevado percentual mostra que a viabilidade econômica dessa atividade depende não apenas das mudanças nos preços de venda dos

Tabela 12.5. TIR, VPL e *Payback* dos sistemas SE, SI, ILP, IPF e ILPF na safra 2024/2025.

Indicador econômico	Sistemas de produção				
	SE	SI	ILP	IPF	ILPF
TIR (%)	13,1	21,3	25,7	17,8	18,7
VPL (R$/ha)*	1.660	6.173	10.638	7.873	7.909
Payback (anos)	5,6	3,9	3,4	6,2	5,1

*Nota: VPL por hectare; taxa de desconto de 9,28% ao ano.
ILP: Integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; SE: pecuária extensiva; SI: pecuária intensiva; TIR: taxa interna de retorno; VLP: valor presente líquido.

animais acabados, mas também está fortemente vinculada às flutuações nos preços pagos na aquisição de garrotes. Esta vulnerabilidade também foi verificada por Reis et al. (2023).

Os sistemas integrados com árvores, IPF e ILPF, mostraram-se viáveis economicamente. As TIR foram 18% e 19%, os VPL alcançaram R$ 7.873,00/ha e R$ 7.909,00/ha, e os tempos de retorno do investimento foram de 6 e 5 anos, respectivamente. Deve-se atentar que o maior investimento inicial e o longo prazo de retorno do componente arbóreo (Figura 12.3) contribuíram para elevar o tempo de *payback* e reduzir a TIR desses sistemas, particularmente quando comparados à ILP e o sistema exclusivo intensivo. É ainda mais importante considerar que a VPL é um indicador mais adequado do que a TIR para comparar projetos de investimento. Nesse caso, observa-se que o VPL da IPF e o VPL da ILPF foram superiores ao dos sistemas de pecuária solteira, considerando a taxa de desconto estabelecida como referência para 2024/2025 de 9,28% ao ano. Observou-se também que o tempo de *payback* do sistema ILPF é inferior ao do IPF, o que pode ser atribuído à presença da lavoura de milho na ILPF por mais tempo nos anos iniciais (Figura 12.1).

O sistema com manejo extensivo (SE) apresentou o menor investimento inicial (Figura 12.3) e revelou ser viável economicamente. Entretanto, seus indicadores de viabilidade foram os que apresentaram a menor atratividade, quando comparados com os dos demais sistemas. A TIR foi 13%, o VPL de R$ 1.660/ha e o tempo de retorno do investimento próximo de seis anos (Tabela 12.5). A baixa taxa de lotação (1,30 UA/ha) foi determinante para indicadores de viabilidade inferiores. Com exceção do ano de reforma do pasto, a aquisição de garrotes para engorda representou 82% dos custos totais anuais. Esse elevado percentual, que também foi observado no sistema intensivo, revela mais uma vez a grande influência que flutuações dos preços pagos pelos garrotes pode exercer sobre os indicadores de viabilidade econômica dos sistemas exclusivos.

A Figura 12.4 permite observar a resiliência de cada sistema de produção, na medida em que a taxa de desconto (assumida aqui como a taxa de juros real) aumenta, considerando os preços vigentes na safra 2024/2025. Os valores do VPL foram positivos para taxas inferiores a 13%, 17%, 18%, 21% e 25%, respectivamente para os sistemas SE, IPF, ILPF, SI e ILP. Observa-se que o sistema extensivo é o mais vulnerável a aumentos da taxa de desconto, enquanto o ILP é o menos vulnerável. Destaca-se também que os VPL dos sistemas integrados são maiores para taxas de desconto inferiores, podendo-se concluir que são mais viáveis e lucrativos em ambientes econômicos com taxas de juros baixas. Observa-se também que a IPF e a ILPF possuem VPL inferiores ao SE apenas para taxas de descontos relativamente elevadas, em que VPL torna-se negativo para as atividades.

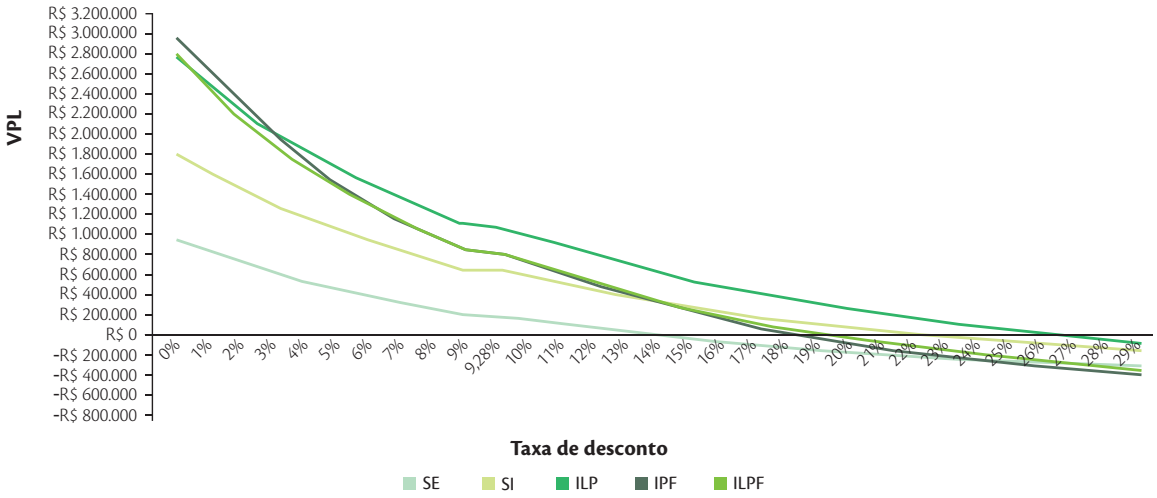


Figura 12.4. Valor Presente Líquido (VPL) na safra 2024/2025, segundo diferentes taxas de desconto, nos sistemas integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF), integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pecuária extensiva (SE) e pecuária intensiva (SI).

12.3.2 Simulação dos indicadores econômicos para a safra 2023/2024 (cenário de preços baixos)

Conforme indicado na seção anterior, os preços dos produtos considerados nos sistemas integrados estudados estavam relativamente elevados no ano agrícola 2024/2025. No ano agrícola 2023/2024, os preços estavam mais baixos, assim como a taxa de juros real, que em setembro de 2024 era de 6,06% ao ano. Considerando esse cenário econômico tão distinto, decidiu-se por reconstruir o fluxo de caixa e recalcular os indicadores de viabilidade. Nessa nova simulação, foram introduzidos os preços vigentes na safra 2023/2024 para: a aquisição de garrotes para engorda (item mais representativo nos custos de produção), a venda milho, a venda do boi gordo e a venda da madeira de eucalipto. Os demais preços e coeficientes técnicos foram mantidos constantes. Um novo fluxo líquido de caixa foi obtido, gerando novos indicadores, os quais serão analisados nessa seção.

A Tabela 12.6 apresenta os resultados dos novos indicadores econômicos, considerando os novos preços. Observa-se que, com os preços menos auspiciosos, notadamente para a pecuária de corte, os sistemas de produção exclusivos (intensivo e extensivo) apresentaram TIR inferior à taxa de desconto, VPL negativo e *payback* mais elevado, inviabilizando-os economicamente. Os sistemas de produção integrados, no entanto, continuaram viáveis, com VPL positivo e TIR levemente superior à taxa de desconto, embora o *payback* da ILPF ainda tenha se mantido elevado. Em grande medida, esse resultado pode ser atribuído à diversificação promovida por esses sistemas.

Tabela 12.6. TIR, VPL e *Payback* dos sistemas SE, SI, ILP, IPF e ILPF na safra 2023/2024.

	Sistemas de produção				
Indicador econômico	**SE**	**SI**	**ILP**	**IPF**	**ILPF**
TIR (%)	5,0	3,8	8,4	7,8	7,7
VPL (R$/ha)*	-543	-1.233	1.604	2.027	1.716
Payback (anos)	10,6	11,2	7,8	11,2	11,4

*Nota: VPL por hectare; taxa de desconto de 6,06% em setembro/2024. ILP: Integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; SE: pecuária extensiva; SI: pecuária intensiva; TIR: taxa interna de retorno; VLP: valor presente líquido.

A Figura 12.5 permite comparar os indicadores dos cinco sistemas em cada ano e entre os dois anos (2023/2024 e 2024/2025). Observa-se que os três sistemas integrados mantiveram-se economicamente viáveis em ambos os anos. No caso do ILP, esse bom desempenho pode ser atribuído à diversificação da produção em uma mesma área, à mitigação do risco relacionado às variações de preço e à possibilidade de uma receita anual com lavoura. Nos sistemas de produção com componente arbóreo, embora os investimentos iniciais sejam elevados e o retorno ocorra em prazo mais longo (*payback* mais alto), é a própria diversificação da produção que se configura como uma estratégia de redução do risco associado preço. Na safra 2023/2024, em que os preços da pecuária e do milho estiveram mais baixos e o preço da madeira ligeiramente superior (4% acima) ao da safra 2024/2025, os sistemas IPF e ILPF foram beneficiados. O sistema de produção intensivo (SI), embora rentável e atrativo no ano de preços favoráveis para a pecuária (2024/2025), é muito vulnerável aos preços mais pessimistas (2023/2024). Nesse caso, a adoção de mecanismos de gestão de risco, a exemplo de contratos a termo e operações de hedge, torna-se uma estratégia possível para minimizar o risco preço.

12.3.3 Simulação dos indicadores econômicos para a Carne Carbono Neutro (CCN)

As análises das seções anteriores não consideraram o valor de externalidades positivas dos projetos. Dentre essas externalidades estão os benefícios de serviços ecossistêmicos que são promovidos por sistemas integrados, como a mitigação de gases do efeito estufa. Pereira et al. (2019) propuseram um cenário em que a indústria de carnes poderia ser capaz de reduzir a emissão de carbono e, assim, receber a certificação "Carne Carbono Neutro – CCN" (Alves et al., 2015). Sistemas integrados com o componente arbóreo seriam protagonistas nesse cenário. Os autores sugeriram um preço *premium* que poderia ser pago ao boi gordo proveniente de sistemas IPF e ILPF certificados no protocolo "Carne Carbono Neutro – CCN". Esse preço seria 2,5% acima do preço de mercado da arroba do boi gordo. O objetivo dessa seção foi o de avaliar o efeito desse prêmio sobre os indicadores de viabilidade econômica.

O preço da arroba do boi entre abril e maio de 2024 (período de venda dos animais no fluxo de caixa) era de R$ 232,00/@. Esse preço seria de R$ 237,8/@ após

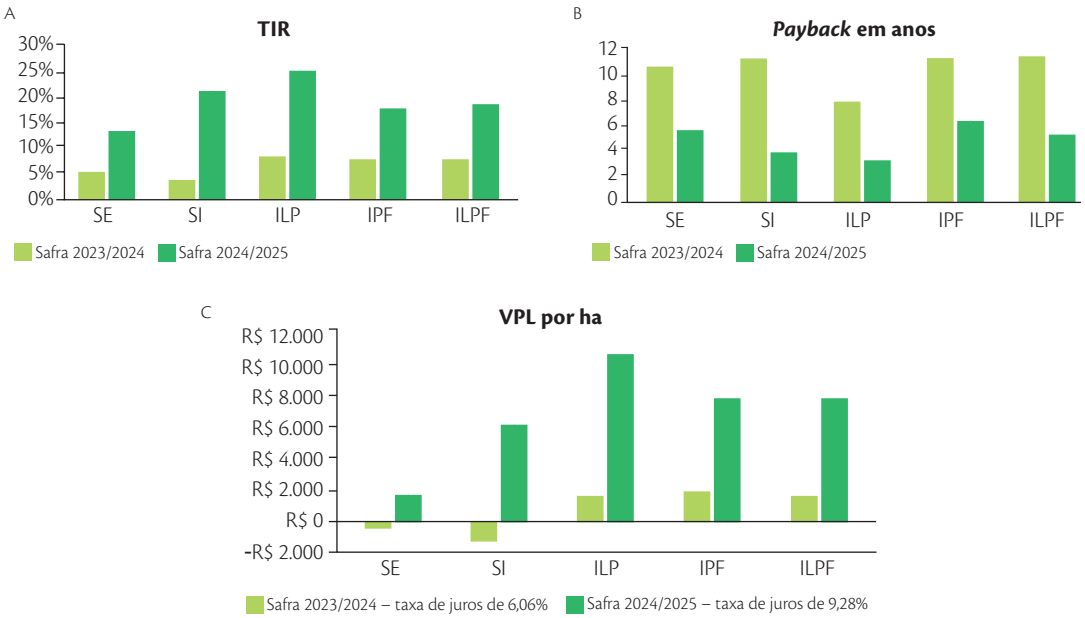


Figura 12.5. (A) TIR, (B) *Payback* (anos), (C) VPL considerando 6,06% ao ano de taxa de desconto na safra 2023/2024 e 9,28% ao ano na safra 2024/2025, para os sistemas integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF), integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pecuária extensiva (SE) e pecuária intensiva (SI).

Tabela 12.7. TIR, VPL e Payback dos sistemas SE, SI, ILP, IPF e ILPF considerando prêmio para a Carne Carbono Neutro – CCN (safras 2023/2024 e 2024/2025).

Sistema	TIR (%)		VPL (R$)*		*Payback* (anos)	
	2023/2024	2024/2025	2023/2024	2024/2025	2023/2024	2024/2025
SE	5,0	13,1	-543	1.660	10,6	5,6
SI	3,8	21,3	-1.233	6.173	11,2	3,9
ILP	8,4	25,7	1.604	10.638	7,8	3,4
IPF	6,8	17,8	2.027	7.873	11,2	6,2
IPF – Certificação Carne Carbono Neutro	**9,1**	**19,5**	**3.562**	**9.436**	**9,5**	**5,7**
ILPF	7,7	18,7	1.716	7.909	11,4	5,1
ILPF – Certificação Carne Carbono Neutro	**8,9**	**20,3**	**3.088**	**9.360**	**9,7**	**4,7**

*Nota: VPL por hectare; taxa de desconto de 6,06% ao ano em setembro/2024 e 9,28% ao ano em agosto/2025.
ILP: Integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta; SE: pecuária extensiva; SI: pecuária intensiva; TIR: taxa interna de retorno; VLP: valor presente líquido.

a adição do prêmio de 2,5%. Em 2025, no mesmo período, o valor da arroba do boi era de R$ 321,73/@, que se eleva para R$ 329,77/@ após considerar o mesmo prêmio. Os novos valores foram introduzidos nos fluxos de caixa dos sistemas IPF e ILPF, supondo que apenas eles estariam aptos para receber a certificação. Dessa forma, novos valores para os indicadores de viabilidade econômica foram obtidos para esses dois sistemas nos anos 2023/2024 e 2024/2025, conforme mostrados na Tabela 12.7.

Como seria de esperar, o incentivo econômico tornaria os sistemas IPF e ILPF mais competitivos. A TIR desses sistemas certificados continuaria acima das taxas de desconto em ambos os anos, indicando a sustentação da viabilidade econômica. As TIR calculadas com a certificação continuaram abaixo daquelas calculadas para o sistema ILP no ano de preços favoráveis para pecuária e milho (2024/2025), mas ficaram acima no ano de preços mais baixos (2023/2024). Este mesmo comportamento foi observado para o VPL. Os VPL

dos sistemas certificados tornar-se-iam bem maiores do que o VPL do sistema ILP no ano 2023/2024 (VPL de R$3.562 no IPF, VPL de R$3.088 no ILPF, comparado com VPL de R$1.604 no ILP). Deve-se atentar que esse foi um ano de preços baixos e que o VPL é mais adequado do que a TIR para comparar dois projetos de investimentos com essas características. O tempo de retorno do investimento diminuiu em ambos os anos, mas ainda se manteve acima do sistema ILP devido ao investimento inicial mais elevado e ao retorno de mais longo prazo do componente arbóreo. Esses resultados revelam o potencial do prêmio associado à certificação da CCN como instrumento de agregação de valor e viabilização econômica dos sistemas integrados com componente arbóreo.

12.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas integrados mostraram-se economicamente viáveis tanto em um ano de preços favoráveis quanto em um ano de preços desfavoráveis para a atividade pecuária. As simulações sugerem a relevância desses sistemas como uma estratégia viável de diversificação econômica e o aumento da receita em propriedades rurais, sendo capazes de mitigar riscos associados às variações de preço.

O sistema ILP apresentou os indicadores econômicos mais atrativos economicamente no ano de 2024/2025 (preços mais altos) e manteve-se economicamente viável no ano 2023/2024 (preços mais baixos). A diversificação da produção na mesma área, com atividades como a produção de milho, que possibilitem obter uma receita anual, além da receita com pecuária, contribuiu para esse resultado. Os sistemas IPF e ILPF apresentaram indicadores economicamente viáveis em ambos os anos, com os indicadores mais atrativos em ano de preços mais baixos para a pecuária e grãos. Os sistemas integrados com o componente florestal apresentaram o maior tempo de retorno do investimento, em grande medida devido ao maior investimento inicial e ao longo tempo para a obtenção da receita com as árvores. Os sistemas com pecuária solteira mostraram-se muito susceptíveis à variação dos preços da pecuária, dada a elevada dependência de um único produto. No ano em que os preços estavam favoráveis, o sistema intensivo apresentou bons indicadores econômicos. No entanto, no ano de preços desfavoráveis, esse sistema mostrou-se economicamente inviável.

A simulação de um prêmio hipotético para a certificação "Carne Carbono Neutro – CCN" mostrou o potencial desse incentivo para promover a adoção de sistemas de produção mais sustentáveis. Certamente, o estabelecimento de prêmios de preço em transações entre agentes das cadeias agroindustriais não é tarefa trivial. O estabelecimento desse tipo de instrumento é muito dependente da capacidade de os agentes construírem formas de transações que considerem atributos de qualidade percebidos pelos consumidores.

Este capítulo apresentou uma análise comparativa de viabilidade econômica, sem considerar um conjunto maior de externalidade positivas e negativas; algo que estudos tradicionais de viabilidade econômica também não têm incorporado. Por exemplo, não se atribuiu valor econômico para externalidades positivas relacionadas ao bem-estar animal, aos serviços ecossistêmicos, ao histórico de carbono no solo e à mitigação de gases de efeito estufa. O papel dos sistemas integrados na consecução de externalidades positivas é abordado em outros capítulos desta obra. Sugerem-se estudos futuros que incorporem o valor econômico dessas externalidades no fluxo de caixa e examinem seu impacto nos indicadores de viabilidade econômica. Adicionalmente, sugere-se o avanço de investigações sobre o potencial de sistemas integrados para mitigar riscos de preço. Nesse caso, métodos mais robustos, como a simulação de Monte Carlo, podem ser adotados.

12.5 REFERÊNCIAS

AGETHEN, K.; MAURICIO, R. M.; DEBLITZ, C.; IZQUIERDO, M. D.; REYES, E.; CHARÁ, J. Future perspectives of Brazilian beef production: what is the role of silvopastoral systems? **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2179-2196, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01005-7.

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A. **Carne Carbono Neutro**: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2015. 29 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 210).

ANSOLIN, R. D.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R.; KAMOI, M. T.; MICHETTI, M.; DOS REIS, J. C.; GARZEL LEODORO DA SILVA, J. C. Economic feasibility analysis of a forest-livestock integration system in Alta Floresta, Mato Grosso State, Brazil. **Floresta**, v. 52, n. 4, p. 441-449, 2022. DOI: http://doi.org/10.5380/rf.v52i4.71475.

ARANHA, A. S. **Desempenho e bem estar de bovinos Nelore na fase de recria mantidos em sistemas integrados de produção agropecuária**. 2016. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias

e Tecnológicas de Dracena, Universidade Estadual Paulista, Dracena.

ARANHA, A. S.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; SANTANA, E. A. R.; LUPATINI, G. C.; ARANHA, A. R.; FONSECA, R.; SEKIYA, B. M. S.; BUENO, L. G. F.; MEIRELLES, P. R. L.; MAESTÁ, S. A.; DA LUZ, P. A.; TRIVELIN, G. A.; CARRIEL, A. C. C.; SANTOS, J. M. F. Seasonal performance and behaviour of Nellore cattle in integrated crop-livestock systems. **South African Journal of Animal Science**, v. 52, n. 3, p. 304-315, 2022.

ARCO-VERDE, M. F.; AMARO, G. C. **Análise financeira de sistemas produtivos integrados**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 74 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 274).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**: visão estratégica para um novo ciclo. Brasília : MAPA, 2021. Disponível em https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/abc-portugues.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P.; PEZZOPANE, J. R.; BERNARDI, A. C. D. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

CALIL, Y. C.; RIBERA, L. Economic feasibility of crop-livestock integration system in Brazil. **Agribusiness**, v. 41, n. 4, p. 1028-1038, 2024. DOI: http://doi.org/10.1002/agr.22007.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C.; RODRIGUES, P. H.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

PEREIRA, M. A.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; COSTA, F. P.; ALVES, F. V. Carbon neutral brazilian beef: an analysis of its economic viability for livestock sustainable intensification. International Farm Management Association Congress, 22., Launceston. **Proceedings** [...]. Bristol: International Farm Management Association, 2019. 14 p.

PERI, P. L.; CHARÁ, J.; VIÑOLES, C.; BUSSONI, A.; CUBBAGE, F. Current trends in silvopastoral systems. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 1945-1953, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01093-5.

PONTES, L. D. S.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MOLETTA, J. L.; TELLES, T. S. Long-term profitability of crop-livestock systems, with and without trees. **Agricultural Systems**, v. 192, p. 103204, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103204.

REIS, J. C.; KAMOI, M. Y. T.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; RODRIGUES, R. A. R.; FARIAS NETO, A. L.. Economic and environmental impacts of integrated systems adoption in Brazilian agriculture-forest frontier. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 5, p. 847-863, 2023. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-023-00831-5.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra. **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-67622005000600012.

TRIVELIN, G. A. **Avaliação econômica de sistemas integrados de produção agropecuária**. 2018. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena, Universidade Estadual Paulista, Dracena.

Capítulo 13

Desempenho Ambiental pela Síntese em Emergia

Gustavo Verruma Bernardi, Rolando Pasquini Neto, Thiago Libório Romanelli, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Sandra Aparecida Santos, José Ricardo Macedo Pezzopane, Alberto Carlos de Campos Bernardi



RESUMO: A busca por sistemas agropecuários sustentáveis exige a integração de práticas produtivas que conciliam eficiência, conservação ambiental e viabilidade econômica. Nesse cenário, a análise de diferentes modelos de produção, desde sistemas intensivos e extensivos até arranjos integrados, torna-se fundamental para compreender os desafios e oportunidades da sustentabilidade ambiental no meio rural. A utilização da síntese emergética como ferramenta de avaliação permite examinar de forma sistêmica os fluxos de energia e recursos, traduzindo-os em uma métrica comum capaz de integrar insumos renováveis e não renováveis, e revelando o equilíbrio (ou desequilíbrio) entre produtividade e impacto ambiental. Ao incorporar essa abordagem, é possível identificar gargalos e potencialidades, orientando decisões de manejo e políticas públicas de forma mais fundamentada. Este capítulo apresenta uma reflexão sobre o papel dos sistemas integrados, como ILP, IPF e ILPF, no enfrentamento das limitações dos modelos convencionais, destacando seu potencial para promover resiliência, diversificação produtiva e conservação dos recursos naturais, contribuindo para a transição rumo a uma agricultura mais equilibrada e adaptada às demandas presentes e futuras.

Palavras-chave: Carga Ambiental; Recursos Renováveis; Transformidade; Impacto Ambiental; Eficiência Produtiva; Conservação Ambiental; Diversificação Rural.

ABSTRACT: The search for sustainable agricultural systems requires the integration of productive practices that reconcile efficiency, environmental conservation, and economic viability. In this scenario, the analysis of different production models, from intensive and extensive systems to integrated arrangements, becomes fundamental to understanding the challenges and opportunities of environmental sustainability in rural areas. The use of emergy

https://doi.org/10.4322/9786586819427-13

synthesis as an evaluation tool allows for a systemic examination of energy and resource flows, translating them into a standard metric that integrates renewable and non-renewable inputs and reveals the balance (or imbalance) between productivity and environmental impact. By incorporating this approach, it is possible to identify bottlenecks and potential, guiding management decisions and public policies in a more grounded way. This chapter presents a reflection on the role of integrated systems, such as ILP, IPF, and ILPF, in addressing the limitations of conventional models, highlighting their potential to promote resilience, productive diversification, and conservation of natural resources, contributing to the transition towards a more balanced agriculture adapted to present and future demands.
Keywords: Environmental Burden; Renewable Resources; Transformity; Environmental Impact; Productive Efficiency; Environmental Conservation; Rural Diversification.

13.1 INTRODUÇÃO

A agropecuária opera na interface entre a natureza e a economia humana, combinando o uso de recursos naturais e de recursos econômicos (constituídos por fontes renováveis e/ou não renováveis de energia) para realizar suas atividades produtivas. Tipicamente, as fontes de energia não renováveis são utilizadas para capturar e concentrar as fontes energéticas provenientes da natureza, como biomassa, hídrica, eólica e geotérmica (Zile, 2021). Nesse contexto, os diferentes sistemas agrícolas dependem de uma combinação desses recursos, o que torna importante comparar a eficiência no uso de todos os insumos utilizados nas práticas agropecuárias numa mesma unidade comum (Campbell, 1998). Se os recursos naturais não forem adequadamente contabilizados em relação aos econômicos, o uso ótimo de cada um deles pode não ser alcançado, e as decisões de gerenciamento serão baseadas em análises incompletas, podendo afetar negativamente a análise ambiental do tripé da sustentabilidade (Ulgiati et al., 1994).

Nesse contexto, a identificação de sistemas de agropecuários que utilizem maiores percentuais de energia renovável se torna essencial, pois tendem a ser mais sustentáveis, do ponto de vista de carga ambiental, do que aqueles que utilizam uma maior porcentagem de energia não renovável (Martin, 2002; Lefroy; Rydberg, 2003), contribuindo, assim, com a mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, as consequências ambientais adversas dos sistemas de produção agrícolas, que podem causar a degradação ambiental, em geral devem ser reduzidas para garantir que a produção futura não seja comprometida (Pimentel et al., 1995). Adicionalmente, a necessidade de adoção generalizada de equipamentos e insumos, como máquinas, fertilizantes e defensivos, para aumentar a produtividade, tem enormes implicações na energia utilizada e, como consequência, no uso excessivo de energias não renováveis por essa atividade (Odum, 1984; Foley et al., 2011; Davis et al., 2012).

No entanto, as informações e análises que consideram os aspectos energéticos investidos direta e indiretamente nesses sistemas e as implicações dessas estratégias de uso da terra para a sustentabilidade e longevidade do ambiente muitas vezes são limitadas, dificultando a afirmação dos sistemas baseados em pastagem como uma alternativa viável para o ambiente. Contudo, há concordância entre autores sobre a importância de considerar a gestão dos recursos (Fischer; Connor, 2018) e mensurar as cargas ambientais dos sistemas de produção e do uso dos recursos por meio de abordagens que considerem todas as dimensões da sustentabilidade: econômica, ambiental e social (Gan et al., 2017). O desenvolvimento de índices para medir a sustentabilidade ambiental agrícola é relativamente recente, e devido à natureza multifacetada da agricultura, diferentes métodos de avaliação têm sido propostos ao longo dos anos, como: a pegada hídrica, pegada de carbono, análise do ciclo de vida, fluxo de materiais, síntese de emergia ou análise termodinâmica (Odum 1996; Brentrup et al., 2004; Minx et al., 2009; Romanelli; Milan, 2010; Arto et al., 2016; Artuzo et al., 2021).

Diante da complexidade envolvida na avaliação da chamada "carga ambiental" desses sistemas agrícolas integrados, torna-se essencial adotar ferramentas metodológicas que permitam mensurar e comparar seu desempenho de maneira integrada. Nesse sentido, a síntese emergética, metodologia de diagnóstico

ambiental utilizada neste capítulo, possui uma abordagem sistêmica e quantitativa eficaz para avaliar a eficiência energética e o desempenho ambiental e econômico de sistemas produtivos, ao considerar não apenas os fluxos econômicos e produtivos, mas também os serviços ecossistêmicos e os recursos incorporados ao longo do processo produtivo.

Este capítulo aborda o uso da síntese emergética em sistemas de produção animal baseados em pastagens por meio da comparação de quatro diferentes modelos: o extensivo, intensivo, a integração lavoura-pecuária e a integração lavoura-pecuária-floresta. A síntese possibilita identificar quais sistemas apresentam maior eficiência no uso de recursos, menor dependência de insumos externos ou comprados e maior capacidade de regeneração ambiental, contribuindo para a formulação de estratégias produtivas compatíveis com os princípios da sustentabilidade. Olhar para os sistemas pela lente da emergia permite, assim, quantificar os custos ambientais, muitas vezes ocultos e não considerados na produção, oferecendo uma métrica abrangente do desempenho sistêmico e subsidiando a tomada de decisão em práticas de manejo sustentável.

13.2 O QUE É "EMERGIA?"

A emergia é caracterizada como a "memória energética" ao longo de um processo, sendo definida como toda a energia disponível utilizada, direta ou indiretamente, no processo de produção de um determinado produto ou serviço (Brown; Ulgiati, 2004), em uma base de unidade comum – o Emjoule solar (sej) –, sendo uma ferramenta capaz de mensurar o uso de recursos e a produção de métodos agrícolas (Brown; Ulgiati, 2004; Artuzo et al., 2021). Esta metodologia de análise de energia quantifica os valores dos recursos naturais e econômicos para mensurar o valor da contribuição ambiental em larga escala para a economia humana (Odum, 1988). Ela é vista como uma abordagem de avaliação "do lado do doador", porque valoriza os itens com base nos insumos energéticos, em vez das preferências dos consumidores. Esta metodologia apresenta vantagens quanto aos métodos econômicos, pois valoriza a verdadeira natureza das contribuições (Martin et al., 2006).

A contabilidade da emergia utiliza os princípios termodinâmicos, valorizando cada tipo de energia, convertendo-as na mesma forma de energia, expressa em joules de energia solar equivalente. Para calcular a emergia solar dos produtos e serviços, são utilizadas várias abordagens, dependendo da natureza dos recursos. Para unidades de energia, multiplica-se a quantidade de energia (por exemplo, joules de petróleo) por sua transformada, que é a razão entre emergia e energia. Para unidades de massa (por exemplo, gramas de milho), é multiplicada por sua emergia específica. Para valores monetários, usualmente adotados para contabilizar serviços, o valor em moeda é multiplicado pela emergia por unidade monetária (Odum, 1988; Brown; Ulgiati, 2004). A síntese emergética tem sido usada para avaliar a sustentabilidade, no ponto de vista ambiental, de diversos sistemas agrícolas, incluindo países como a Argentina (Rotolo et al., 2007), Austrália (Lefroy; Rydberg, 2003), China (Chen et al., 2006), EUA (Martin et al., 2006; Sulc; Franzluebbers, 2014), Itália (Ulgiati et al., 1994; Patrizi et al., 2018), México (Alfaro-Arguello et al., 2010), Suécia (Rydberg; Jansen, 2002), e Brasil (Cavalett et al., 2006; Buller et al., 2015; Barros et al., 2017; Reis et al., 2020). Assim, a emergia funciona como uma estimativa da magnitude do trabalho realizado pela natureza e pela sociedade (Brown; Ulgiati, 1997; Odum, 1996).

13.3 SÍNTESE EM EMERGIA DOS SISTEMAS AGROPECUÁRIOS INTEGRADOS

Nesse sentido, a síntese em emergia foi utilizada na avaliação ambiental dos sistemas integrados, fornecendo indicadores da sustentabilidade e eficiência de uso de recursos, a partir da quantificação da energia utilizada nos processos de produção, permitindo uma avaliação abrangente dos impactos ambientais e da viabilidade econômica.

A análise emergética foi realizada no sistema ILPF-Corte da Embrapa Pecuária Sudeste (Capítulo 3), a partir da seleção de quatro sistemas distintos de produção agropecuária. Os sistemas foram selecionados tanto por seus distintos graus de intensificação, quanto pela diversidade de produtos obtidos. Os sistemas extensivo e intensivo concentram-se exclusivamente na produção de carne bovina, representando, respectivamente, modelos de baixa e alta intervenção tecnológica e uso de insumos. Por sua vez, o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) agrega à produção de carne a produção de milho para silagem.

Já o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) incorpora, além dos dois anteriores, o componente arbóreo, por meio da produção de madeira de eucalipto, configurando-se como um sistema de uso múltiplo da terra com elevado grau de complexidade ecológica e econômica.

A construção da base de dados utilizada na análise fundamenta-se em séries históricas e resultados de experimentos conduzidos de maneira contínua na própria área experimental da Embrapa entre os anos de 2011 e 2024 (Capítulo 12). Isso representa 14 anos de dados consolidados, abrangendo desde a fase inicial de implantação até a consolidação dos sistemas produtivos. As informações foram sistematizadas a partir de uma combinação de registros diretos, monitoramentos experimentais e validação por meio de literatura técnica especializada (Pezzopane et al., 2017; Vinholis et al., 2021; Meo Filho et al., 2022; Oliveira et al., 2024).

As entradas e saídas dos sistemas foram quantificadas e expressas em valores médios anuais por área (ha^{-1} ano^{-1}), o que possibilita comparações padronizadas entre os diferentes modelos produtivos. Para melhor visualização das interações sistêmicas, foram elaborados diagramas de fluxo emergético (Figuras 13.1, 13.2, 13.3 e 13.4), conforme a simbologia estabelecida por Odum (1996) e posteriormente aprimorada por Brown (2004). Esses diagramas permitem representar, de forma gráfica e conceitual, as conexões entre os fluxos de energia, matéria e capital, desde suas origens até a geração dos produtos, evidenciando a complexidade dos processos e as relações entre os componentes internos e externos aos sistemas analisados.

A etapa seguinte, após de definidos os diagramas, consistiu na quantificação emergética dos fluxos, estruturada por meio de uma tabela detalhada (Tabela 13.1), que relaciona cada item de entrada e saída com sua respectiva unidade física – seja energia (Joules), massa (gramas) ou valor monetário (dólares). Esses valores foram, então, convertidos para emergia solar equivalente (seJ) por meio da aplicação dos Valores Unitários de Emergia (UEV). Esses coeficientes refletem a quantidade de energia solar necessária, em escala global, para gerar um determinado recurso, permitindo a unificação das diferentes unidades sob uma métrica termodinâmica comum (Tabela 13.1).

Todos os fluxos emergéticos expressos em seJ ha^{-1} ano^{-1} e os cálculos foram ajustados à linha de base global de emergia estabelecida por Brown et al. (2016), fixada em 12,1 × 1024 seJ ano^{-1}. Essa padro-

Para realizar a análise, os recursos utilizados pelos sistemas foram classificados em três grandes grupos, descritos a seguir :

Recursos Locais Renováveis (R), que incluem elementos naturais, como luz solar, precipitação, energia eólica, energia cinética e processos geológicos naturais, considerados abundantes e de baixa entropia;

Recursos Locais Não Renováveis (N), representados pelo uso e pela degradação do solo superficial, cuja regeneração ocorre em escalas de tempo geológicas;

Recursos Econômicos (F), os quais abarcam todos os insumos adquiridos externamente ao sistema, como fertilizantes minerais (N, P, K), corretivos como calcário, combustíveis fósseis, defensivos agrícolas, sementes comerciais, bezerros, suplementos minerais, mão de obra contratada, serviços terceirizados e infraestrutura produtiva.

A síntese da análise emergética é organizada com base em três componentes principais:

Contribuição da Natureza (R + N): representando a soma dos fluxos de emergia dos recursos renováveis e não renováveis locais, ou seja, a parcela oriunda diretamente dos ecossistemas e da geobioesfera;

Conntribuição Econômica (F): correspondente à soma dos fluxos de emergia dos insumos adquiridos, refletindo o grau de dependência do sistema em relação a fluxos externos e infraestrutura artificial;

Saída do Sistema (Y): total de emergia incorporada nos produtos finais, sejam eles carne, silagem de milho ou madeira, expressando a utilidade biofísica gerada pelos sistemas analisados.

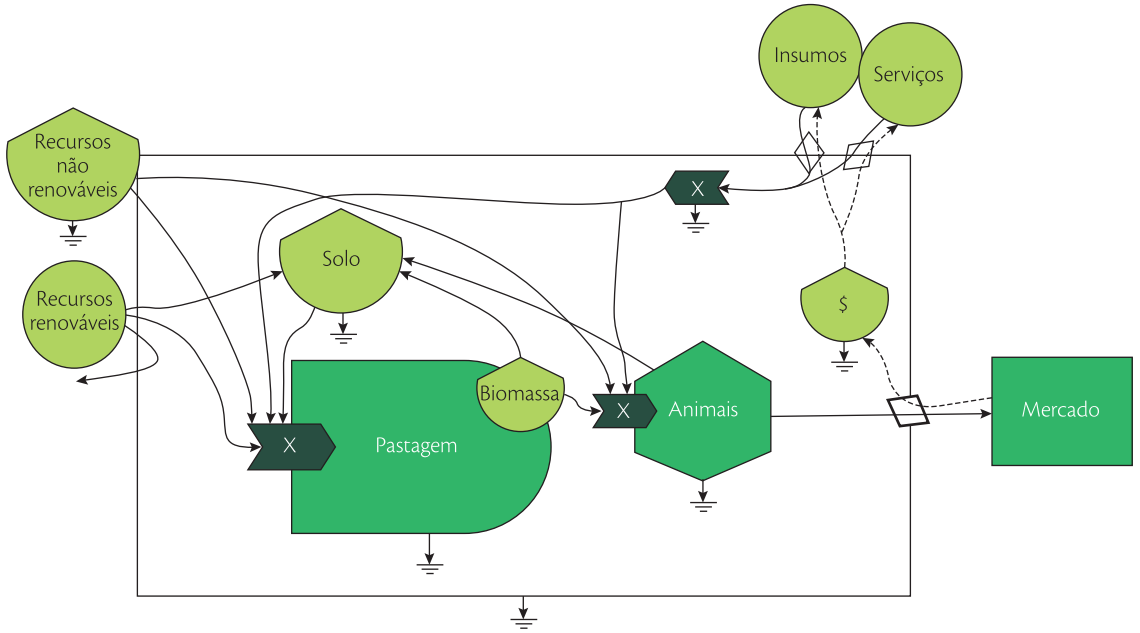


Figura 13.1. Diagrama de fluxo de emergia do sistema extensivo.

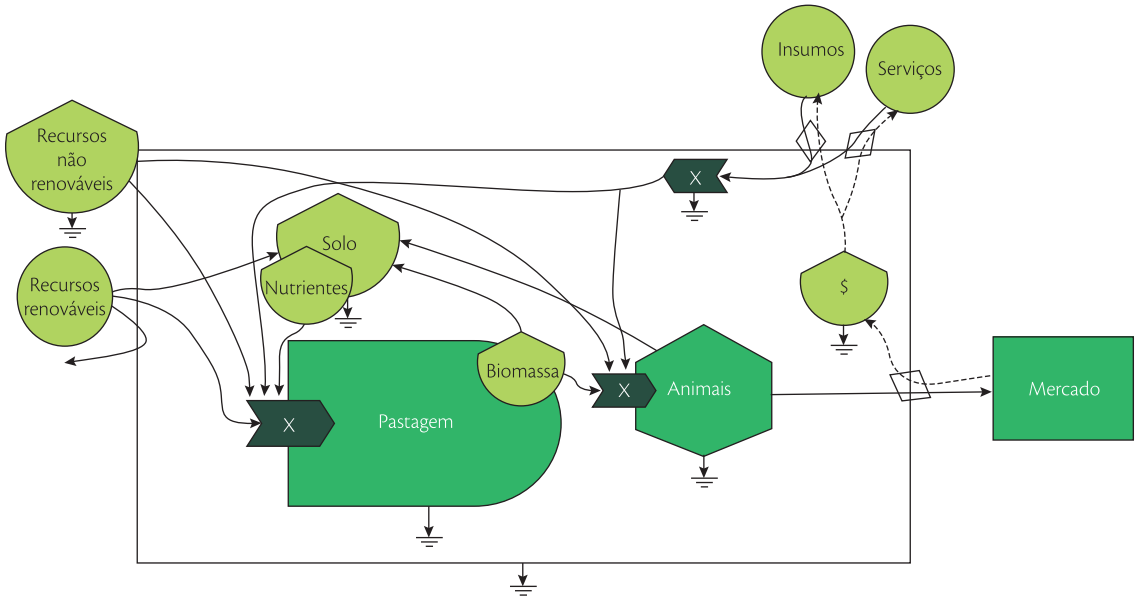
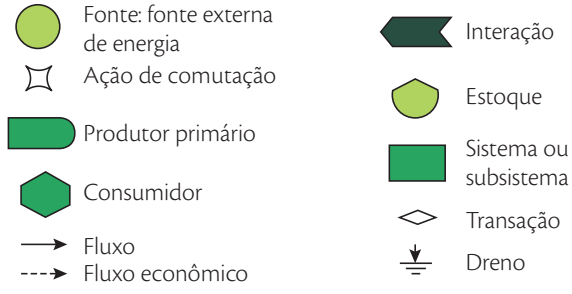


Figura 13.2. Diagrama de fluxo de emergia do sistema intensivo.

nização garante a comparabilidade internacional dos resultados e permite avaliar os sistemas em um contexto mais amplo de sustentabilidade ambiental global. O horizonte temporal considerado para essa análise corresponde a um ano agrícola completo, de modo a incorporar as variações climáticas, econômicas e operacionais refletidas nos dados históricos, proporcionando uma avaliação mais robusta e representativa.



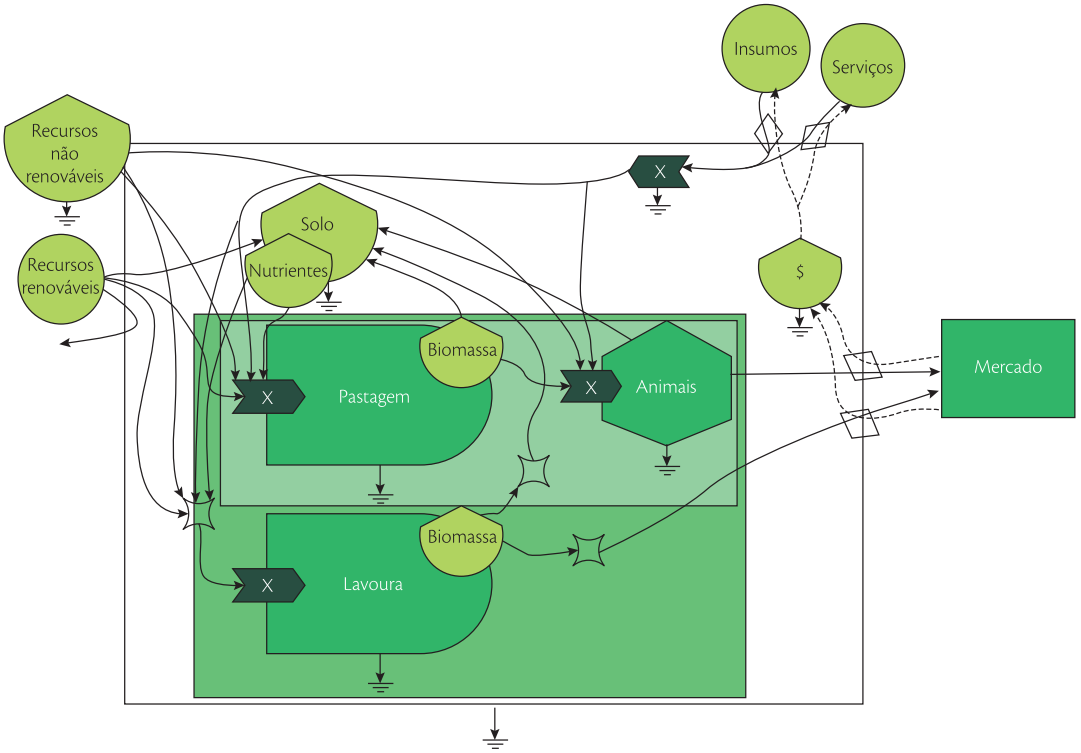


Figura 13.3. Diagrama de fluxo de emergia do sistema integração lavoura-pecuária (ILP).

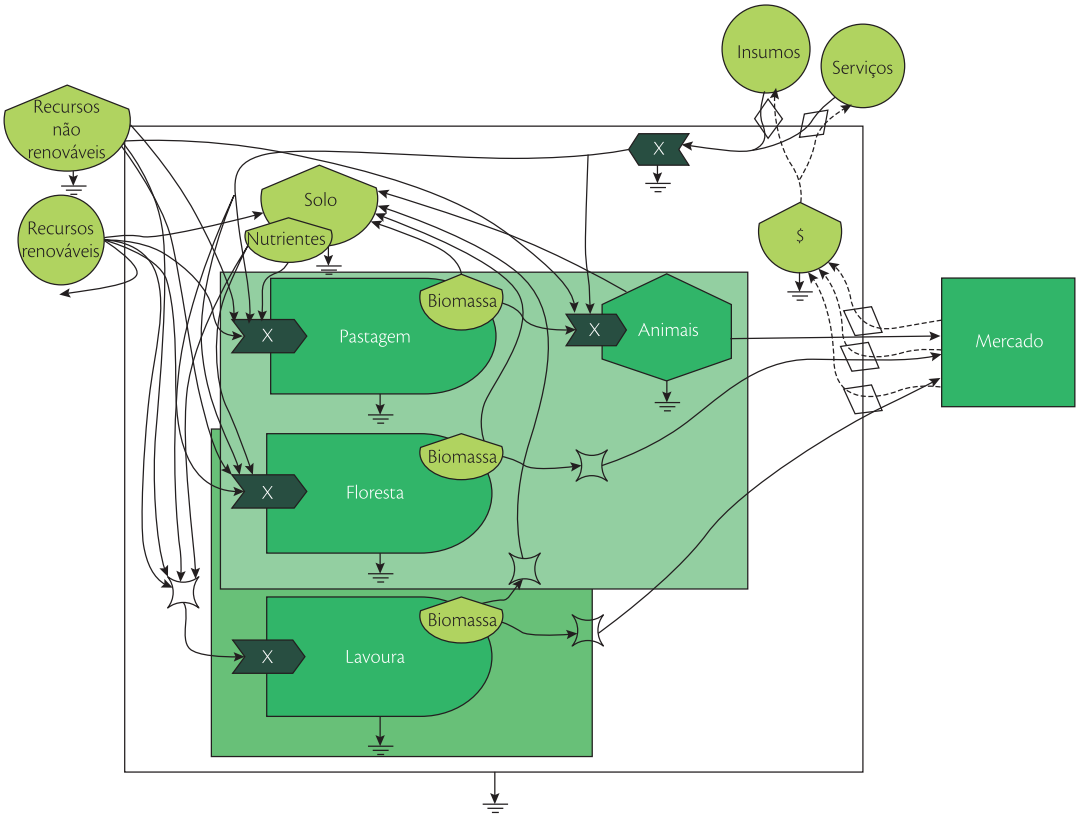


Figura 13.4. Diagrama de fluxo de emergia do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

Tabela 13.1. Valores dos recursos renováveis locais (R), recursos não renováveis locais (N), recursos comprados (F) e produtos (Y) e seus Valores Unitários de Emergia (UEVs), para os quatro sistemas avaliados.

Item	Unidade Bruta	Extensivo	Intensivo	ILP	ILPF	UEV (sej/unidade)	Referência	Emergia Solar (sej/ano)			
								Extensivo	Intensivo	ILP	ILPF
Recursos Locais Renováveis (R)											
Luz solar	J	5,57E+13	5,57E+13	5,57E+13	5,57E+13	1,00E+00	por definição	5,57E+13	5,57E+13	5,57E+13	5,57E+13
Chuva	J	3,43E+10	3,43E+10	3,43E+10	3,43E+10	3,57E+04	Odum et al. (2000)	1,22E+15	1,22E+15	1,22E+15	1,22E+15
Vento, energia cinética	J	1,39E+06	1,39E+06	1,39E+06	1,39E+06	1,86E+03	Odum et al. (2000)	2,59E+09	2,59E+09	2,59E+09	2,59E+09
Ciclo terrestre	J	1,00E+10	1,00E+10	1,00E+10	1,00E+10	9,12E+03	Odum et al. (2000)	9,12E+13	9,12E+13	9,12E+13	9,12E+13
Recursos Locais Não Renováveis (N)											
Perdas de solo superficial	J	9,17E+07	1,20E+08	6,77E+08	2,36E+08	5,62E+04	Brown e Bardi (2001)	5,15E+12	6,74E+12	3,81E+13	1,33E+13
Recursos Comprados (F)											
Combustível	J	0,00E+00	1,44E+09	2,67E+09	2,67E+09	8,43E+04	Odum (1996)	0,00E+00	1,21E+14	2,25E+14	2,25E+14
Calcário	g	1,43E+05	6,67E+05	3,33E+05	6,67E+05	1,28E+09	Odum (1996)	1,83E+14	8,53E+14	4,27E+14	8,53E+14
Nitrogênio	g	4,57E+03	8,84E+04	9,26E+04	8,84E+04	5,87E+09	Odum (1996)	2,68E+13	5,19E+14	5,44E+14	5,19E+14
Fósforo	g	2,07E+03	2,35E+04	2,74E+04	5,66E+04	2,27E+10	Odum (1996)	4,70E+13	5,32E+14	6,22E+14	1,28E+15
Potássio	g	3,79E+03	1,19E+04	3,15E+04	6,23E+04	2,22E+09	Odum (1996)	8,40E+12	2,64E+13	6,99E+13	1,38E+14
Defensivos agrícolas	g	0,00E+00	0,00E+00	5,67E+03	2,43E+03	1,12E+10	Brandt-Williams (2001)	0,00E+00	0,00E+00	6,35E+13	2,72E+13
Sementes (Milho)	g	0,00E+00	0,00E+00	6,67E+03	2,86E+03	1,50E+09	Rotolo (2015)	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+13	4,29E+12
Sementes (Pasto)	J	1,44E+07	6,72E+07	4,48E+07	4,36E+07	2,89E+05	Rotolo et al. (2007)	4,16E+12	1,94E+13	1,29E+13	1,26E+13
Bezerros	J	1,96E+09	3,59E+09	1,89E+09	3,25E+09	2,21E+06	Rotolo et al. (2007)	4,34E+15	7,94E+15	4,18E+15	7,19E+15
Suplemento alimentar (minerais)	g	4,88E+04	4,88E+04	3,25E+04	4,88E+04	7,60E+08	Castellini et al. (2006)	3,71E+13	3,71E+13	2,47E+13	3,71E+13
Mão de obra	J	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	5,75E+06	Brandt-Williams (2001)	1,26E+13	1,26E+13	1,26E+13	1,26E+13
Mudas	unidade	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,56E+01	1,60E+11	Romanelli (2010)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,10E+12
Serviços, infraestrutura	$	4,84E+01	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	4,26E+12	Giannetti et al. (2018)	2,06E+14	4,38E+14	4,38E+14	4,38E+14
Emergia Total	–	–	–	–	–	–	–	5,02E+15	1,07E+16	6,81E+15	1,08E+16
Saídas (Y)											
Produção total, peso seco	g	2,28E+05	4,73E+05	1,34E+07	–	–	–	–	–	–	–
Produção total	J	3,94E+09	8,18E+09	2,22E+11	2,52E+11	–	–	–	–	–	–

Traço (–): informação não aplicável.

Além da visualização gráfica por meio dos diagramas de fluxo, a metodologia empregada envolveu a aplicação de índices emergéticos clássicos como ferramentas de síntese do desempenho de cada sistema (Tabela 13.2). A análise emergética, por meio desses índices, oferece uma base comum para comparar diferentes sistemas de produção, permitindo avaliar sua eficiência e sustentabilidade de forma integrada. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em diversos contextos regionais e tipos de uso do solo, incluindo sistemas de cultivo (Ortega et al., 2005; Chen et al., 2006; Martin et al., 2006; Rotolo et al., 2007; Barros et al., 2017), sistemas pecuários (Alfaro-Arguello et al., 2010; Rotolo et al., 2007) e sistemas integrados de lavoura-pecuária (Cavalett et al., 2006; Agostinho; Pereira, 2013; Sulc; Franzluebbers, 2014; Buller et al., 2015; Fonseca et al., 2016; Patrizi et al., 2018).

A Tabela 13.3 apresenta os resultados dos índices emergéticos para os quatro sistemas de produção investigados.

A transformidade, definida como a razão entre a emergia total e a energia disponível do produto, é um indicador-chave na análise emergética, pois permite comparar a eficiência relativa dos sistemas quanto ao uso de recursos. Sistemas com menor transformidade são, portanto, mais eficientes na incorporação de recursos em unidade de produto. Entre os sistemas avaliados, os sistemas integrados, como o ILP e especialmente o ILPF, apresentaram os menores valores de transformidade, indicando maior eficiência energética. Esse desempenho se deve à combinação sinérgica das atividades de lavoura, pecuária e silvicultura, que favorece o aproveitamento dos fluxos internos de energia e nutrientes e reduz a dependência de insumos externos com elevados valores de emergia específica (UEVs).

Em contraste, o sistema intensivo apresentou os maiores valores de transformidade, refletindo sua forte dependência de insumos externos e menor capacidade de conversão emergética, uma vez que depende inteiramente da conversão energética animal para sua

Tabela 13.2. Índices emergéticos.

Índice	Definição	Equação
Renovabilidade (R%)	Proporção da emergia total derivada de fontes renováveis locais.	R / (R + N + F)
Índice de Rendimento Emergético (EYR)	Mede a capacidade do sistema de amplificar os insumos econômicos por meio do aproveitamento de recursos ambientais.	Y / F
Razão de Carga Ambiental (ELR)	Indica o grau de pressão sobre o ambiente, refletindo a relação entre recursos não renováveis e renováveis.	(N + F) / R
Índice de Investimento Emergético (EIR)	Avalia a dependência do sistema em relação a insumos externos, comparando-os aos recursos gratuitos do ambiente.	F / (R + N)
Pegada Emergética (ha)	Estimativa da área equivalente que seria necessária para suprir todos os insumos com recursos renováveis locais.	A_renov + A_não renov
Transformidade (Tr)	Quantifica a emergia por unidade de energia útil gerada, expressando a complexidade do processo produtivo.	E / Y

Fonte: Adaptado de Odum (1996), Brown e Ulgiati (1997) e Wright e Ostergård (2016).

Tabela 13.3. Índices emergéticos para diferentes sistemas de produção animal.

Índices	Extensivo	Intensivo	ILP	ILPF
Transformidade (Tr) (sej/J)	1.272.146,17	1.302.207,41	30.675,37	42.891,61
Renovabilidade (R%) (%)	0,21259	0,11116	0,16478	0,10891
Índice de Rendimento de Emergético (EYR)	1,271333	1,125780	1,204163	1,123609
Razão de Carga Ambiental (ELR)	3,703876	7,996282	5,068813	8,181783
Índice de Investimento Emergético (EIR)	3,685510	7,950404	4,898043	8,089998
Pegada Emergética (ha)	1,11E+02	2,12E+02	1,43E+02	2,17E+02

produtividade. Já o sistema extensivo, embora com produtividade mais baixa, apresentou valores de transformidade semelhantes ao intensivo, o que é coerente com sua baixa complexidade e produtividade, dependentes predominantemente de recursos renováveis.

Com olhar voltado ao índice de Razão de Carga Ambiental (ELR), o qual mede o estresse ambiental imposto pelo sistema, os sistemas intensivo e ILPF apresentaram o maior valor de ELR, evidenciando uma alta dependência de recursos externos e maior pressão ambiental, de acordo com os elevados UEVs associados aos insumos utilizados (Brown; Herendeen, 1996). Os sistemas extensivo e ILP, embora diferentes na estratégia produtiva, apresentaram ELR similares, indicando que a rotação no ILP compensa parcialmente, nesse caso, a maior intensificação de uso do solo.

Já o índice de Razão de Investimento em Emergia (EIR), que reflete a dependência do sistema em relação à economia externa, os resultados mostram que o extensivo apresenta o menor EIR, evidenciando menor necessidade de suporte externo, seguido pelo sistema ILP, seguido pelo intensivo e, por último, o ILPF. Sistemas de produção com menor EIR são menos dependentes de insumos adquiridos externamente ao sistema, o que os torna menos susceptíveis às variações de preços de mercado dos insumos.

Por fim, a Razão de Rendimento de Emergia (EYR), que expressa a relação entre a emergia total gerada e a emergia investida, os sistemas com menor uso de insumos externos tendem a apresentar valores mais elevados de EYR, por utilizarem para seu funcionamento os recursos locais. Os sistemas intensivo e ILPF, embora apresentem elevada produtividade, obtiveram o menor EYR, indicando baixa eficiência emergética.

É importante lembrar, que os índices da análise emergética devem ser interpretados de forma integrada, e não isoladamente, uma vez que existe uma relação de compensação entre eles, ou seja, a melhora em um indicador pode vir acompanhada da piora em outro, exigindo uma avaliação sistêmica (Li et al., 2021). Na comparação entre os sistemas ILPF, ILP e o sistema intensivo, observou-se que o índice EIR (Emergy Investment Ratio) foi mais elevado no sistema intensivo e no ILPF, em comparação ao ILP. No caso do ILPF, esse valor elevado pode ser atribuído ao alto custo inicial associado à implantação do componente arbóreo; no entanto, esse investimento tende a ser diluído ao longo do tempo, o que justifica a importância de análises temporais para melhor avaliar sua viabilidade e eficiência emergética. A ausência desses custos de implantação no sistema ILP contribui para seu menor valor de ELR (Environmental Loading Ratio) em relação ao ILPF.

Apesar dos valores de ELR similares entre o sistema ILPF e o sistema intensivo, essa semelhança deve ser interpretada com cautela. Enquanto o sistema intensivo depende continuamente de insumos não renováveis, o ILPF tende a reduzir progressivamente essa dependência à medida que o sistema se estabelece e os fluxos internos de energia se intensificam. Já o sistema extensivo apresentou os menores valores de carga ambiental (ELR), refletindo seu uso predominante de recursos renováveis e sua baixa dependência de insumos externos. Bhatti et al. (2020) destacam, nesse sentido, a importância da transição de sistemas intensivos para configurações mais sustentáveis, com ênfase no aproveitamento eficiente de recursos renováveis locais.

O desempenho adequado dos sistemas integrados, portanto, depende da manutenção dos serviços ecossistêmicos associados ao solo. A não reposição adequada desses recursos pode levar à degradação progressiva (Foley et al., 2011), comprometendo a sustentabilidade a longo prazo.

13.4 PEGADA EMERGÉTICA: UM ÍNDICE COMPLEMENTAR

A Pegada Emergética, conceito desenvolvido por Wright (2016), foi utilizada como índice adicional para ilustrar a pressão ambiental dos sistemas. Esse indicador expressa a área teórica (em hectares) necessária para gerar, a partir de recursos renováveis locais, todos os insumos utilizados na produção.

Os valores de pegada revelam que o sistema ILPF teria que ser 217 vezes maior para manter sua atividade apenas com recursos renováveis locais. Para o sistema ILP, esse valor é de 143 vezes, para o intensivo, 212, e o extensivo, 111 vezes. Esses resultados corroboram os índices anteriores, indicando que os sistemas intensivo e ILPF impõem a maior carga ambiental entre os avaliados.

Para uma visualização clara de cada natureza dos fluxos de entrada, estão apresentados na tabela a seguir os valores únicos de recursos renováveis locais, não renováveis locais e comprados (Tabela 13.4).

Tabela 13.4. Avaliação emergética resumida em recursos renováveis locais (R), recursos não renováveis locais (N) e recursos comprados (F).

Recursos/Sistemas	Extensivo	Intensivo	ILP	ILPF
Renováveis (R) (seJ ano^{-1})	1,31E+15	1,31E+15	1,31E+15	1,31E+15
Não renováveis (N) (seJ ano^{-1})	5,15E+12	6,74E+12	3,81E+13	1,33E+13
Econômicos (F) (seJ ano^{-1})	4,86E+15	1,05E+16	6,62E+15	1,07E+16

A dependência de recursos comprados (F) mostrou-se elevada nos quatro sistemas, com destaque para a contribuição significativa da compra de bezerros, mão de obra, serviços, infraestrutura para todos os sistemas, além de mudas de eucalipto para o sistema ILPF. Esses itens, considerados insumos não locais, representaram a maior fração da emergia total. O custo energético de infraestrutura e serviços destacou-se, representando cerca de 25% dos fluxos emergéticos nos sistemas analisados.

Entre os recursos renováveis locais (R), o sistema extensivo apresentou maior proporção relativa, seguido do sistema ILP, seguido do ILPF e do sistema intensivo. Essa diferença reflete a menor inserção de insumos externos no sistema extensivo, que, embora apresente menor produtividade absoluta de carne, depende mais fortemente de recursos naturais gratuitos, conferindo-lhe maior autonomia e resiliência. Tal padrão também é evidenciado por Reis et al. (2020), que destacam o papel dominante da chuva, responsável por 93% da emergia da categoria R em todos os sistemas.

Rodríguez-Ortega et al. (2017) destacam que os sistemas mais sustentáveis tendem a utilizar mais recursos renováveis locais (maior R%) e menos insumos industriais, mas a adoção da integração pode levar a um caminho de intensificação sustentável, com ganhos em eficiência, embora eventualmente com menor sustentabilidade emergética. Esse comportamento foi também observado neste estudo: o sistema extensivo teve a maior renovabilidade (0,22), enquanto o sistema ILP demonstrou um equilíbrio intermediário entre os extremos representados pelo sistema intensivo e o sistema ILPF.

13.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, a análise comparativa dos diferentes sistemas agropecuários, com base na síntese emergética, evidencia que não existe um modelo produtivo único capaz de atender, simultaneamente, às demandas de elevada produtividade e de conservação ambiental sem considerar as especificidades ecológicas e socioeconômicas de cada contexto. A avaliação dos índices emergéticos revela um *trade-off* intrínseco entre rendimento e sustentabilidade: sistemas intensivos, embora apresentem elevadas taxas de produtividade e eficiência aparente, dependem fortemente de insumos externos não renováveis, exercendo maior pressão sobre o ambiente e comprometendo a resiliência ecológica a longo prazo. Em contrapartida, sistemas extensivos demonstram menor dependência de recursos externos e menor impacto ambiental direto, mas apresentam limitações expressivas em termos de rendimento e aproveitamento do potencial produtivo da terra.

Nesse cenário, a implementação de sistemas integrados, como integração lavoura-pecuária (ILP), integração lavoura-floresta (ILF), integração pecuária-floresta (IPF) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), surge como estratégia promissora para mitigar os extremos desse *trade-off*. Esses modelos têm o potencial de combinar eficiência energética, diversificação produtiva e conservação dos recursos naturais, desde que acompanhados de manejo criterioso que valorize o uso racional de insumos e a manutenção da funcionalidade ecológica, com especial atenção à conservação do solo e ao aproveitamento sustentável dos recursos renováveis locais.

Conforme salientam Sánchez-Escobar et al. (2018), medir e comparar o equilíbrio entre produtividade e carga ambiental nos sistemas agrícolas é etapa essencial para compreender e aprimorar sua sustentabilidade. Essa abordagem reforça que a transição para sistemas mais equilibrados e resilientes não se limita à incorporação de novas tecnologias ou práticas isoladas, mas requer uma integração coerente entre avanços

técnicos e princípios ecológicos, considerando também aspectos econômicos e sociais.

O uso da emergia como ferramenta de avaliação, ao sintetizar a dinâmica de fluxos de energia e recursos, oferece uma visão sistêmica que transcende métricas convencionais, permitindo identificar gargalos, potencialidades e prioridades de intervenção. Essa perspectiva possibilita que decisões de manejo e políticas públicas sejam pautadas por indicadores que traduzem, de forma integrada, a eficiência produtiva e o custo ambiental das atividades agropecuárias.

Assim, a construção de sistemas agropecuários sustentáveis passa necessariamente pela incorporação de práticas conservacionistas, pelo estímulo à diversificação produtiva e pelo monitoramento contínuo dos fluxos de energia e recursos. A adoção dessas estratégias não apenas atende às necessidades atuais de produção de alimentos, fibras e energia, mas também assegura a manutenção da capacidade produtiva e da integridade ambiental para as futuras gerações, consolidando a sustentabilidade como eixo estruturante das transformações no setor agrícola.

13.6 REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as an indicator of environmental load: comparison between embodied energy, ecological footprint, and emergy accounting methods. **Ecological Indicators**, v. 24, p. 494-503, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.006.

ALFARO-ARGUELLO, R.; DIEMONT, S. A.; FERGUSON, B. G.; MARTIN, J. F.; NAHED-TORAL, J.; ÁLVAREZ-SOLÍS, J. D.; RUÍZ, R. P. Steps toward sustainable ranching: an emergy evaluation of conventional and holistic management in Chiapas, Mexico. **Agricultural Systems**, v. 103, n. 9, p. 639-646, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.08.002.

ARTO, I.; CAPELLÁN-PÉREZ, I.; LAGO, R.; BUENO, G.; BERMEJO, R. The energy requirements of a developed world. **Energy for Sustainable Development**, v. 33, p. 1-13, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.001.

ARTUZO, F. D.; ALLEGRETTI, G.; SANTOS, O. B.; SILVA, L. X.; TALAMINI, E. Emergy unsustainability index for agricultural systems assessment: A proposal based on the laws of thermodynamics. **The Science of the Total Environment**, v. 759, p. 143524, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524.

BARROS, I.; PACHECO, E. P.; CARVALHO, H. W. L. Integrated emergy and economic performance assessments of maize production in semiarid tropics: comparing tillage systems. **Journal of Environmental Accounting and Management**, v. 5, n. 3, p. 211-232, 2017. DOI: http://doi.org/10.5890/JEAM.2017.09.004.

BHATTI, M. A.; EIK, L. O.; STEINHEIM, G.; ADNEY, T.; HORNELAND, R.; WYNN, P.; HOPKINS, D. L.; ASHEIM, L. J. Rangeland grazing strategies to lower the dependency on imported concentrates in Norwegian sheep meat production. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 5340, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/su12135340.

BRANDT-WILLIAMS, S. L. **Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation**. Folio n. 4: emergy of Florida agriculture. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2001.

BRENTRUP, F.; KÜSTERS, J.; KUHLMANN, H.; LAMMEL, J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 3, p. 247-264, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00024-8.

BROWN, M. T. A picture is worth a thousand words: energy systems language and simulation. **Ecological Modelling**, v. 178, n. 1-2, p. 83-100, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.008.

BROWN, M. T.; BARDI, E. **Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation**. Folio n. 3. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2001.

BROWN, M. T.; HERENDEEN, R. A. Embodied energy analysis, and emergy analysis: a comparative view. **Ecological Economics**, v. 19, n. 3, p. 219-235, 1996. DOI: http://doi.org/10.1016/S0921-8009(96)00046-8.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, v. 9, n. 1-2, p. 51-69, 1997. DOI: http://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Energy quality, emergy, and transformity: HT Odum's contributions to quantifying and understanding systems. **Ecological Modelling**, v. 178, n. 1-2, p. 201-213, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002.

BROWN, M.; CAMPBELL, D.; VILBISS, C.; ULGIATI, S. The geobiosphere emergy baseline: a synthesis. **Ecological Modelling**, v. 339, p. 92-95, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.03.018.

BULLER, L. S.; BERGIER, I.; ORTEGA, E.; MORAES, A.; BAYMA-SILVA, G.; ZANETTI, M. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–livestock systems: case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil. **Agricultural Systems**, v. 137, p. 206-219, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.11.004.

CAMPBELL, D. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the state of Maine. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 51, n. 1-2, p. 531-569, 1998. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1006043721115.

CASTELLINI, C.; BOGGIA, A.; CORTINA, C.; DAL BOSCO, A. Sustainability of poultry production using the emergy approach:

comparison of conventional and organic rearing systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 2-4, p. 343-350, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.014.\

CAVALETT, O.; QUEIROZ, J. F.; ORTEGA, E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. **Ecological Modelling**, v. 193, n. 3-4, p. 205-224, 2006. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.023.

CHEN, G. Q.; JIANG, M. M.; CHEN, B.; YANG, Z. F.; LIN, C. Emergy analysis of Chinese agriculture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 115, n. 1-4, p. 161-173, 2006. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2006.01.005.

DAVIS, A. S.; HILL, J. D.; CHASE, C. A.; JOHANNS, A. M.; LIEBMAN, M. Increasing cropping system diversity balances productivity, profitability and environmental health. **PLoS One**, v. 7, n. 10, p. e47149, 2012. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0047149.

FISCHER, R. A.; CONNOR, D. J. Issues for cropping and agricultural science in the next 20 years. **Field Crops Research**, v. 222, p. 121-142, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.03.008.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTROM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337-342, 2011. DOI: http://doi.org/10.1038/nature10452.

FONSECA, A. M. P.; MARQUES, C. A.; PINTO-CORREIA, T.; CAMPBELL, D. E. Emergy analysis of a silvo-pastoral system, a case study in southern Portugal. **Agroforestry Systems**, v. 90, n. 1, p. 137-157, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-015-9888-5.

GAN, X.; FERNANDEZ, I. C.; GUO, J.; WILSON, M.; ZHAO, Y.; ZHOU, B.; WU, J. When to use what: methods for weighting and aggregating sustainability indicators. **Ecological Indicators**, v. 81, p. 491-502, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.068.

GIANNETTI, B. F. et al. Towards more sustainable social housing projects: recognizing the importance of using local resources. **Building and Environment**, v. 127, p. 187-203, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.033.

LEFROY, E.; RYDBERG, T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. **Ecological Modelling**, v. 161, n. 3, p. 195-211, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00341-1.

LI, Y.; SUN, Z.; ACCATINO, F.; HANG, S.; LV, Y.; OUYANG, S. Comparing specialised crop and integrated crop-livestock systems in China with a multi-criteria approach using the emergy method. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, p. 127974, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127974.

MARTIN, J. F. Emergy valuation of diversions of river water to marshes in the Mississippi River Delta. **Ecological Engineering**, v. 18, n. 3, p. 165-186, 2002. DOI: http://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00082-9.

MARTIN, J. F.; DIEMONT, S. A. W.; POWELL, E.; STANTON, M.; LEVY-TACHER, S. Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 115, n. 1-4, p. 128-140, 2006. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.016.

MEO FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef cattle in the Atlantic Forest biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy12112738.

MINX, J. C.; WIEDMANN, T.; WOOD, R.; PETERS, G. P.; LENZEN, M.; OWEN, A.; SCOTT, K.; BARRETT, J.; HUBACEK, K.; BAIOCCHI, G.; PAUL, A.; DAWKINS, E.; BRIGGS, J.; GUAN, D.; SUH, S.; ACKERMAN, F. Input–output analysis and carbon footprinting: an overview of applications. **Economic Systems Research**, v. 21, n. 3, p. 187-216, 2009. DOI: http://doi.org/10.1080/09535310903541298.

ODUM, H. T. Energy analysis of the environmental role in agriculture. In: STANHILL, G. (ed.) **Energy and Agriculture**. Berlin: Springer, 1984. p. 24-51. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-69784-5_3.

ODUM, H. T. Self-organization, transformity, and information. **Science**, v. 242, n. 4882, p. 1132-1139, 1988. DOI: http://doi.org/10.1126/science.242.4882.1132.

ODUM, H. T. **Environmental accounting, emergy and decision making**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996. 384 p.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic Forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, p. 127219, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219.

ODUM, H. T.; ODUM, E. P. The energetic basis for valuation of ecosystem services. **Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 21-23, 2000. DOI: http://doi.org/10.1007/s10021-000-0005-x.

ORTEGA, E.; CAVALETT, O.; BONIFÁCIO, R.; WATANABE, M. Brazilian soybean production: emergy analysis with an expanded scope. **Bulletin of Science, Technology & Society**, v. 25, n. 4, p. 323-334, 2005. DOI: http://doi.org/10.1177/0270467605278367.

PATRIZI, N.; NICCOLUCCI, V.; CASTELLINI, C.; PULSELLI, F.; BASTIANONI, S. Sustainability of agro-livestock integration: Implications and results of Emergy evaluation. **The Science of the Total Environment**, v. 622-623, p. 1543-1552, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.029.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 39-49, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. Environmental and economic

costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v. 267, n. 5201, p. 1117-1123, 1995. DOI: http://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117.

REIS, J.; RODRIGUES, G.; BARROS, I.; RODRIGUES, R.; GARRETT, R.; VALENTIM, J.; KAMOI, M.; MICHETTI, M.; WRUCK, F.; RODRIGUES-FILHO, S.; PIMENTEL, P.; SMUKLER, S. Integrated crop-livestock systems: a sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124580, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124580.

RODRÍGUEZ-ORTEGA, T.; BERNUES, A.; OLAIZOLA, A. M.; BROWN, M. T. Does intensification result in higher efficiency and sustainability? An emergy analysis of Mediterranean sheep-crop farming systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 171-179, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.089.

ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Energy performance of a production system of eucalyptus. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 896-903, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800014.

ROTOLO, G. C.; FRANCIS, C.; CRAVIOTTO, R. M.; ULGIATI, S. Environmental assessment of maize production alternatives: traditional, intensive and GMO-based cropping patterns. **Ecological Indicators**, v. 57, p. 48-60, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.036.

ROTOLO, G. C.; RYDBERG, T.; LIEBLEIN, G.; FRANCIS, C. Emergy evaluation of grazing cattle in Argentina's Pampas. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 119, n. 3-4, p. 383-395, 2007. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2006.08.011.

RYDBERG, T.; JANSEN, J. Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis. **Ecological Engineering**, v. 19, n. 1, p. 13-28, 2002. DOI: http://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0.

SÁNCHEZ-ESCOBAR, F.; COQ-HUELVA, D.; SANZ-CAÑADA, J. Measurement of sustainable intensification by the integrated analysis of energy and economic flows: Case study of the olive-oil agricultural system of Estepa, Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 463-470, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.294.

SULC, M.; FRANZLUEBBERS, A. Exploring integrated crop–livestock systems in different ecoregions of the United States. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 21-30, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.007.

ULGIATI, S.; ODUM, H. T.; BASTIANONI, S. Emergy use, environmental loading and sustainability: an emergy analysis of Italy. **Ecological Modelling**, v. 73, n. 3-4, p. 215-268, 1994. DOI: http://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90064-7.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; SHIMATA, I.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Economic viability of a crop-livestock integration system. **Ciência Rural**, v. 51, n. 2, p. e20190538, 2021. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190538.

WRIGHT, C.; OSTERGÅRD, H. Renewability and emergy footprint at different spatial scales for innovative food systems in Europe. **Ecological Indicators**, v. 62, p. 220-227, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.042.

ZILE, M. Sustainable energy systems based on the multi-energy sources. In: TABATABAEI, N. M.; BIZON, N. (ed.). **Numerical methods for energy applications**. Cham: Springer, 2021. p. 285-316. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-62191-9_11.

Capítulo 14

Serviços Ecossistêmicos e Ambientais

Sandra Aparecida Santos, Alberto Carlos de Campos Bernardi, José Ricardo Macedo Pezzopane, Rolando Pasquini Neto, Laysa Fontes Moura, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Estella Rosseto Janusckiewicz, Sergio Raposo de Medeiros, Maria Luiza Franceschi Nicodemo



RESUMO: Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) podem ser planejados de diversas formas, combinando os componentes numa mesma área de forma sinérgica, de acordo com o clima, solo e objetivos do produtor rural. Não há um modelo único e para que esse arranjo seja eficiente e multifuncional, é importante conhecer os processos e funções para maximizar os serviços ambientais. Este capítulo descreve alguns dos principais serviços ambientais gerados, com foco nos sistemas integração-pecuária-floresta ou silvipastoril (IPF) e integração lavoura-pecuária (ILP) de acordo com a classificação de CICES (Common International Classification of Ecosystem). Esta classificação divide os serviços ecossistêmicos em três categorias principais: provisão, regulação e cultural e permite a comparação entre diferentes estudos, regiões e países. Os principais serviços foram apresentados e discutidos conforme estudos realizados nos diferentes tipos de IPF e arranjos de ILP no Brasil e outras partes do mundo. Finalmente, é abordado o sistema de pagamento por serviços ambientais (PSA), uma ferramenta econômica que oferece compensações financeiras para quem adota práticas sustentáveis e seguem políticas ambientais. Essa é uma forma de incentivar a utilização de sistemas integrados que maximizem os serviços ambientais e tragam benefícios ao meio ambiente.

Palavras-chave: Agricultura Regenerativa; Produção Animal; Sustentabilidade; Pagamento por Serviços Ambientais.

ABSTRACT: Integrated crop-livestock-forestry (ICLF) systems can be planned in various ways, combining components synergistically within the same area, depending on climate, soil, and the objectives of the rural producer. There is no single model, and for this arrangement to be efficient and multifunctional, it is important to understand the processes and functions to maximize environmental services. This chapter describes some of the primary environmental services generated, focusing on ICLF (integrated livestock-forestry, or silvopastoral) and ICL (integrated crop-livestock) systems

https://doi.org/10.4322/9786586819427-14

according to the CICES (Common International Classification of Ecosystems). This classification divides ecosystem services into three main categories: provisioning, regulation, and cultural, and allows comparison between different studies, regions, and countries. The main services were presented and discussed based on studies of various ICLF and ICL arrangements in Brazil and other parts of the world. Finally, the payment for environmental services (PES) system is addressed, an economic tool that offers financial compensation to those who adopt sustainable practices and follow environmental policies. This approach promotes the adoption of integrated systems that optimise environmental services and deliver substantial environmental benefits.
Keywords: Regenerative Agriculture; Animal Production; Sustainability; Payment for Environmental Services.

14.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) podem gerar diversos serviços ecossistêmicos/ambientais para determinado negócio e/ou sociedade (Costanza, 2020) (Figura 14.1).Por isso, diante das diferentes combinações possíveis, o grande desafio desses sistemas consiste no entendimento dos seus processos e funções para a implantação de práticas e tecnologias de manejo, que otimizem os serviços almejados (Tui et al., 2021). Com o entendimento dos processos do Capital Natural, que envolve o estoque de recursos naturais renováveis e não renováveis que se interagem para produzir os serviços ecossistêmicos (Costanza, 2020), podemos estabelecer práticas de manejo que maximizem esses serviços. Isso também nos permite ajustar e adaptar o manejo diante das mudanças climáticas (Assad, 2021).

A definição de SA ou SE depende se houve ou não a interferência humana. Adicionalmente, existem várias outras classificações, mas serão considerados somente os serviços finais (que têm valor direto sobre decisões políticas, econômicas e ambientais – o que não exclui a importância dos serviços de suporte, que são intermediários), utilizando a classificação e estrutura hierárquica definida pelo Common International Classification of Ecosystem Services – CICES (2013; 2025), versão 5.1, que permite agregar os diferentes tipos de serviços (Haines-Young; Potschin, 2018) em três categorias principais: provisão, regulação e culturais.

Nas Figuras 14.2, 14.3 e 14.4 são apresentados os fluxogramas dos principais serviços de provisão, regulação e cultural, em que são apresentados alguns exemplos de serviços ecossistêmicos e seus respectivos processos/práticas com base na classificação CICES, versão 5.1. O uso dessa classificação internacional possibilita comparar os tipos de serviços com os de outros países.

A capacidade de gerar serviços, independentemente da demanda, corresponde ao potencial do ecossistema em oferecer serviços de forma sustentável. Esse potencial pode ser ampliado por meio de estratégias de manejo, porém, o aumento de um serviço pode comprometer outros, especialmente o que ocorre em sistemas de uso intensivo (Hein et al., 2016).

Serviços ecossistêmicos (SE) expressam os fluxos de serviços e bens fornecidos pelos ecossistemas à sociedade (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Esses variam de acordo com o tipo e a capacidade (função) do ecossistema em gerar serviços sob as condições atuais de uso, independentemente da linha base (Hein et al., 2016), que ocorrem naturalmente, sem interferência humana.

Serviços ambientais (SA) são resultantes das práticas de manejo (intervenções intencionais) na dinâmica dos ecossistemas (Muradian et al., 2010), contribuindo com a manutenção e/ou incremento dos serviços ecossistêmicos, como os sistemas integrados de produção.

14.1.1 Sistemas de integração lavoura-pecuária

A adoção do sistema integração lavoura-pecuária (ILP) pelos pecuaristas é motivada tanto por motivos econômicos de recuperação de pastagens degradadas, quanto por preocupação com os impactos ambientais, impulsionados por pressões dos mercados (internos e externos) e da sociedade por uma produção mais sustentável. Para os produtores de grãos, o principal fator motivador para a adoção do sistema ILP é a maior rentabilidade proporcionada pelo sistema (Skorupa; Manzatto, 2019).

Common International Classification of Ecosystem Services – CICES (2013, 2025)

- **Provisão:** incluem os bens e produtos que podem ser utilizados diretamente pelo ser humano ou para comercialização, como madeira, carne e leite, mel, forragem e volumoso para alimentação animal, biocombustíveis, medicamentos naturais, recursos ornamentais, entre outros (Macêdo Carvalho et al., 2024).
- **Regulação:** envolvem a regulação climática, hídrica, da qualidade do solo, de doenças, pragas, polinização, de distúrbios, entre outros conjuntos complexos de processos que garantem que os nutrientes circulem de forma adequada nos ecossistemas, sustentando a vida e mantendo a saúde ambiental.
- **Culturais:** são aqueles que permitem lazer e recreação, a preservação do conhecimento tradicional e as relações sociais, entre outros.

Segundo Martins et al. (2016), a adoção do sistema ILP busca a redução da abertura de ciclos, concentrando-se numa mesma área e otimizando o uso da terra e ciclagem de nutrientes; e a ecologia industrial, onde resíduos de uma espécie se tornam recurso para outra e otimização do uso da terra com a promoção de serviços ecossistêmicos. Como as configurações (arranjos) dos sistemas ILP têm influência nos serviços ecossistêmicos, os autores relataram a importância de realizar oficinas participativas entre os diferentes atores do processo para melhor desenhar o sistema.

Nas três possibilidade de arranjos do ILP (rotação, sucessão e consórcio), destaca-se a importância das culturas de cobertura, pois elas aumentam a retenção de N, reduzem o escoamento superficial e a erosão (Martins et al., 2016) e melhoram a eficiência de N e outros nutrientes (Diacono; Montemurro, 2010), diminuindo a necessidade de insumos químicos (Swarnam et al., 2016).

14.1.2 Sistemas de integração pecuária-floresta

A maior diversidade dos sistemas integração pecuária-floresta (IPF) ou silvipastoris (SSP) encontra-se na

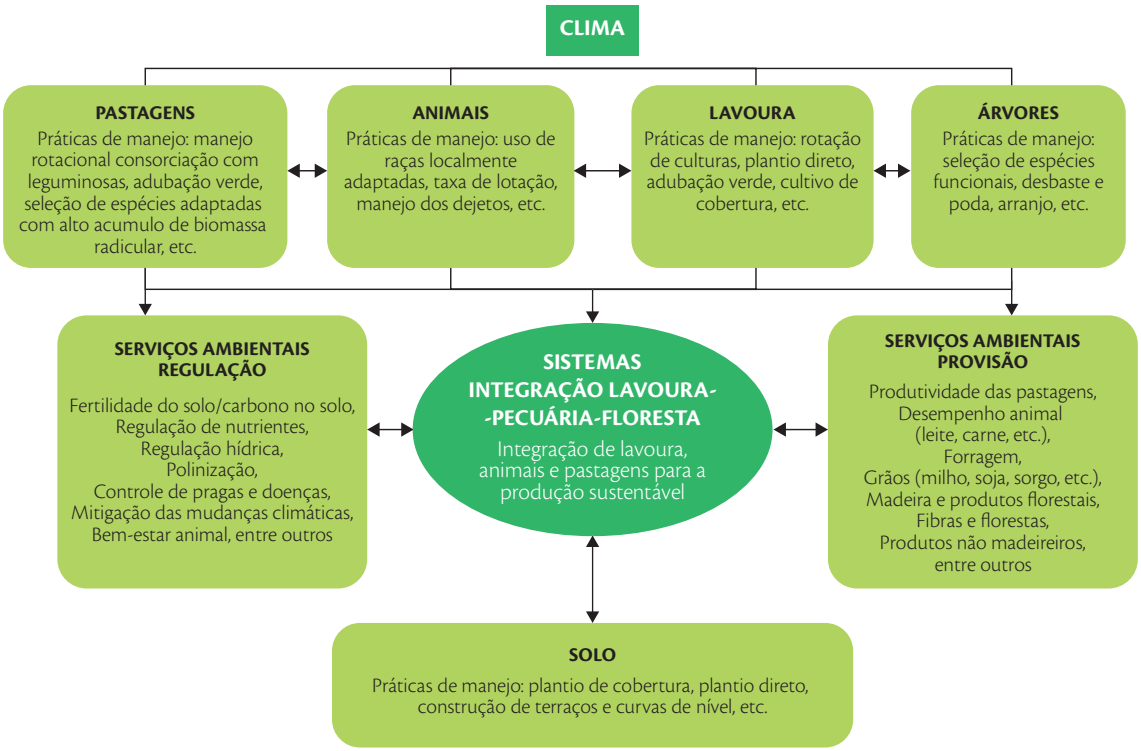


Figura 14.1. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e serviços ambientais.

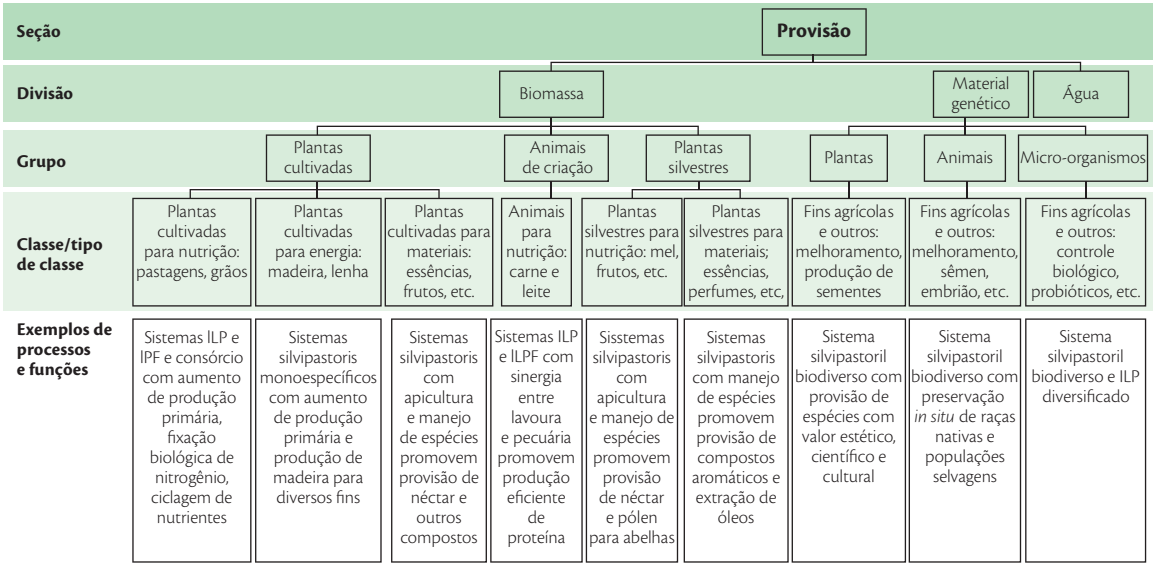


Figura 14.2. Ilustração da estrutura hierárquica dos serviços ambientais de provisão provenientes de sistemas integrados usando a classificação CICES v5.1.

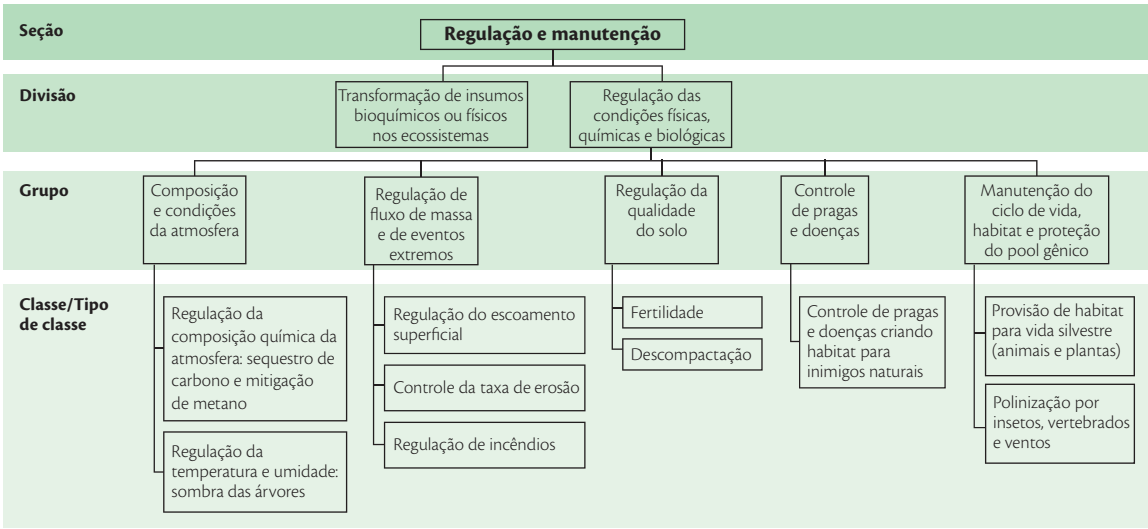
América Latina (Pezo et al., 2018), sendo considerados e descritos como uma modalidade de sistema agroflorestal (Macêdo Carvalho et al., 2024) com os seguintes tipos: sistema parque, SSP em ilhas, SSP em linhas, SSP "*cut-and-carry*", SSP agroflorestal, sistema de bosque, sistema multiestrato, sistema ripário e sistema de contorno ou cerca viva. Neste capítulo, serão abordados os SSP:

- **Monoespecíficos:** planejados geralmente com o uso de apenas uma espécie de árvore, como o eucalipto, principalmente *Eucalyptus urograndis* e *E. urophylla* (Pezzopane et al., 2021; Schettini et al., 2021); a teca (*Tectona grandis*) (Cabral et al., 2017), a macaúba (*Acrocomia aculeata*) (Leite et al., 2013), entre outras espécies que podem ser manejadas de forma temporária ou permanente. Esses sistemas podem ser intensificados na busca de maior produtividade, eficiência e sustentabilidade (Araújo et al., 2023; Andrade et al., 2021). São sistemas também indicados para restauração de áreas degradadas, como fonte de renda na propriedade rural por meio da exploração da madeira (Ribaski et al., 2023) e como estratégia para resiliência à seca (Ghaffariyan; Brown, 2025) (Figura 14.5).
- **Biodiversos:** planejados com o foco na biodiversidade e uso multifuncional, buscando promover o uso eficiente da terra e a produção de serviços de provisão, regulação e culturais (Sales-Baptista; Ferraz-de-Oliveira, 2021). Esses podem ser planejados para a produção de produtos não madeireiros (Bento et al., 2020), por exemplo, frutas, medicamentos e mel (Figura 14.6).
- **Naturais e/ou enriquecidos:** consistem na utilização de paisagens naturais ou nativas que integram espécies de plantas (arbustivas e herbáceas) e animais (domésticos e silvestres) existentes em uma área que podem ser enriquecidos com outras espécies adicionais mais produtivas, incluindo forrageiras e arbóreas para melhorar a biodiversidade e produtividade (Santos et al., 2009) (Figura 14.7).

14.2 CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

14.2.1 Serviços de provisão

Os serviços de provisão incluem os bens e produtos que podem ser utilizados diretamente pelo ser humano ou para comercialização, como madeira, carne e leite, mel, forragem e volumoso para alimentação animal, biocombustíveis, medicamentos naturais, recursos ornamentais, entre outros (Macêdo Carvalho et al., 2024). São considerados a provisão de biomassa (plantas cultivadas e nativas, madeira, fibras, combustíveis), água, recursos genéticos, recursos bioquímicos e medicinais, recursos ornamentais e recursos bióticos (Figura 14.2).



Exemplos de processos e funções	
	Sistema silvipastoril monoespecífico ou biodiverso/ILP/consórcio/ Manejo dos dejetos promove aumento do carbono orgânico no solo e redução de emissões por melhoria na dieta
	Sistema silvipastoril reduz a temperatura e melhora o conforto térmico animal
	Plantio de cobertura ou uso de adubo verde na fase de implantação ou de produção de sistemas integrados promovem regulação hídrica e aumento de infiltração
	Plantio de cobertura ou uso de adubo verde na fase de implantação ou de produção de sistemas integrados promovem regulação hídrica e aumento de infiltração
	Manejo de pastagens, plantio de cobertura, sistemas silvipastoris, terraceamento promovem regulação hídrica, melhoria na prorosidade do solo
	Sistemas silvopastoris com tratos culturais controlam acúmulo de combustível, modulação da umidade, barreiras naturais por meio do uso de espécies com baixa combustibilidade
	Sistemas ILP, IPF e ILPF, consórcio, manejo de dejetos aumentam produção primária, matéria orgânica no solo, ciclagem de nutrientes, fixação de nitrogênio (se leguminosa)
	Sistemas ILP (manejo de resíduos, presença de pastagem) melhoram a estrutura do solo, redução da compactação e erosão pelo pisoteio controlado e cobertura vegetal
	Controle de pragas com a criação de habitat favorável para inimigos naturais; sistemas silvipastoris biodiversos promovem regulação de pragas e doenças e diversidade funcional
	Sistema silvipastoril biodiverso ou natural/ILP diversificado relacionados com diversidade funcional, aumento da complexidade estrutural, oferta de abrigo e alimento para fauna e flora selvagens
	Sistemas silvipastoris biodiversos e natural aumentam polinização, diversidade funcional e promovem provisão de flores e habitats para polinizadores

ILP: integração lavoura-pecuária; IPF: integração pecuária-floresta; ILPF: integração lavoura-pecuária-floresta.
Figura 14.3. Ilustração da estrutura hierárquica dos serviços ambientais de regulação e manutenção provenientes de sistemas integrados usando a classificação CICES v5.1.

14.2.1.1 Provisão de biomassa de forragens

Em sistemas IPF, a produtividade de forrageiras depende do manejo da interceptação luminosa no sistema, pois a presença de árvores é responsável por interceptar a radiação solar por meio de sua copa, influenciando a produtividade das pastagens, significativamente, a partir de 35% de sombreamento (Pezzopane et al., 2024a). Portanto, no planejamento de sistemas com árvores, é importante definir um espaçamento que permita a entrada de luz para as pastagens, selecionar espécies de árvores adaptadas e monitorar o desenvolvimento por meio de poda e desbaste (Lima et al., 2020; De Macêdo Carvalho et al., 2024). Nesse contexto, Oliveira et al. (2022) verificaram que

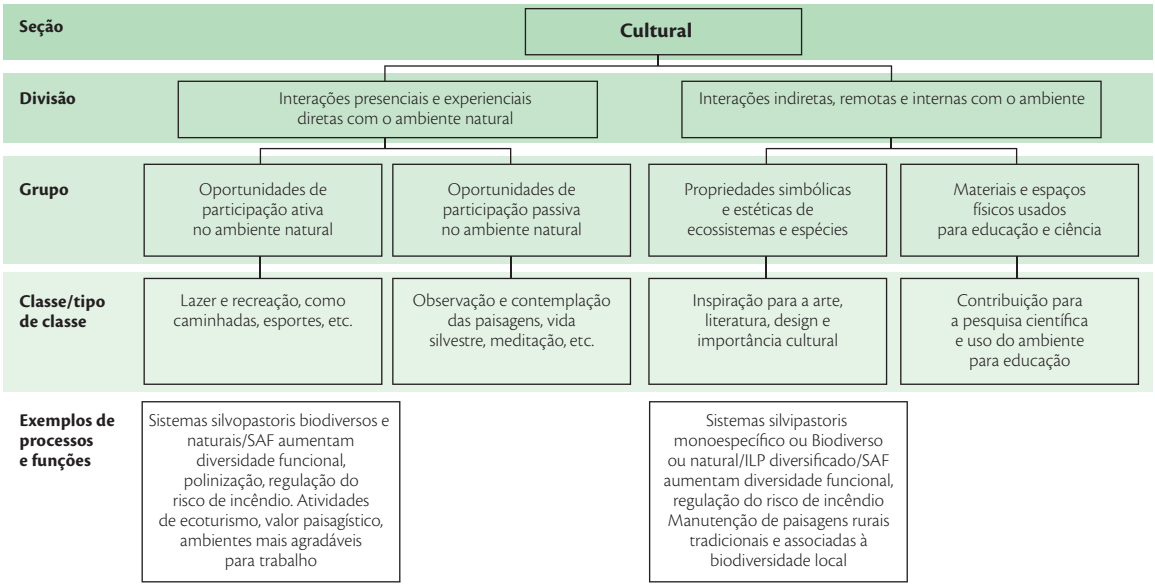


Figura 14.4. Ilustração da estrutura hierárquica dos serviços ambientais culturais provenientes de sistemas integrados usando a classificação CICES v5.1.



Foto: Sandra Aparecida Santos.

Figura 14.5. Sistema silvipastoril (SSP) monocultivo com eucalipto.



Foto: Jose Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 14.6. Sistema silvipastoril (SSP) biodiverso com diversas árvores nativas, e pastagem consorciada com leguminosas.



Figura 14.7. Sistema silvipastoril (SSP) natural na sub-região de Miranda, Pantanal-MS.

em SSP de eucalipto e braquiária, a melhor produção forrageira se deve à densidade de 99 plantas/ha e espaçamento entre linhas maior do que 28 metros.

Alguns sistemas silvipastoris utilizam árvores como fontes forrageiras (Santos et al., 2009; Olivares-Pérez et al., 2016; Sanchez et al., 2021). Nas diferentes regiões do Brasil são encontradas diversas espécies lenhosas utilizadas como forrageiras. Pott e Pott (2003) sugeriram 116 espécies lenhosas para sistemas agroflorestais e suas múltiplas utilidades, das quais 23 são forrageiras. Araújo Filho (2013) descreveu o manejo das principais espécies lenhosas forrageiras da Caatinga. Sánchez-Romero et al. (2022) avaliaram 16 espécies de árvores quanto ao seu potencial forrageiro em SSP para a alimentação animal e verificaram que, dentre as espécies avaliadas como leucena (*Leucaena leucocephala*), mutambo (*Guazuma ulmifolia*), *Caesalpinia coriaria* e árvore-de-caixa-de-areia (*Hura polyandra*), apresentaram potencial excepcional por produzirem quantidades significativas de folhagem e frutos com alto valor nutritivo.

Os sistemas silvipastoris com consorciação de gramíneas e leguminosas contribuem com uma dieta biodiversa funcional para bovinos. As principais leguminosas utilizadas têm sido *Arachis pintoi* (Homem et al., 2024; Marchi et al., 2022), *Cajanus cajan* (Pezzopane et al., 2024b), *Leucaena leucocephala*, *Samanea saman*, *Prosopis* spp., *Mimosa caesalpiniifolia* (De Macêdo Carvalho et al., 2024), entre outras (Figura 14.8). Conforme estudos de Matta et al. (2024) após a introdução de guandu em pastagens degradadas de braquiária, a produção passou de 1,85 para 4,4 t de MS por ha, enquanto Furtado et al. (2023) verificaram um ganho de peso diário nas pastagens recuperadas com guandu, aumentando de 304 para 478 gramas.



Foto: Sandra Aparecida Santos.

Figura 14.8. Bovinos consumindo inflorescência de guandu durante o período seco em um sistema silvipastoril (SSP) de árvores nativas com pastagem consorciada.

Com relação ao ILP, Guimarães et al. (2017) avaliaram a produtividade de biomassa de milho para silagem (*Zea mays*) em consórcio com braquiária (*Urochloa ruziziensis*) e diferentes densidades de feijão-guandu (até 200 mil plantas por ha) e verificaram que o guandu não teve influência na produtividade do milho, mas melhorou o valor nutritivo da silagem, além de beneficiar a composição balanceada da palhada, com materiais de rápida e lenta decomposição. Muniz et al. (2022) avaliaram a sucessão de soja com capim paiaguás e tamani na região do Cerrado brasileiro em fevereiro e verificaram produção de massa seca satisfatória de ambas as cultivares na entressafra, pois as forrageiras se beneficiam dos resíduos culturais.

14.2.1.2 Produção de madeira, produção de lenha, produção de biomassa

Quando o objetivo do produto é produção de madeira, os sistemas silvipastoris monoespecíficos são os mais utilizados. Brunetti et al. (2025), avaliando um SSP composto por árvores de eucalipto ao longo de um ciclo de dois desbastes (2016 e 2019) para o manejo animal, observaram que as árvores de oito a doze anos, com 166 árvores por ha, produziram um volume anual de madeira de 15,8 m^3 por ha, com potencial para aplicações comerciais de alto valor.

No caso do uso da utilização de árvores nativas, o produtor deve seguir a legislação local para comercialização da madeira. Nicodemo (2018) publicou um documento com orientações para plantio, colheita e comercialização de espécies florestais nativas da Mata Atlântica no estado de São Paulo. Além da produção de madeiras, as árvores podem ser utilizadas como quebra-ventos ou cercas vivas, como a *Gliricidia sepium* (Queiróz et al., 2015), *Mimosa caesalpiniifolia* (Ribaski, 2003), *Morus* spp., entre outras.

Sistemas silvipastoris podem fornecer biomassa para a geração de energia, considerada uma das opções renováveis na matriz energética do futuro, porém é importante fazer a análise da viabilidade econômica com base nos parâmetros tarifários do mercado de energia. Esses sistemas também podem conter o risco de incêndio (Andrade et al., 2021).

14.2.1.3 Provisão de mel e outros materiais biológicos

O desenvolvimento de sistemas integrados com ambientes favoráveis aos polinizadores traz inúmeros benefícios, especialmente com a presença de espécies arbóreas leguminosas. Em sistemas SSP, geralmente, as espécies leguminosas forrageiras não são manejadas para produção de flores, portanto, recomenda-se a criação de jardins com espécies apícolas como *Cajanus cajan*, *Centrosema* spp., *Chamaecrista rotundifolia*, *Desmodium* spp. e *Gliricidia sepium* (Narjes et al., 2021). De acordo com Rauw et al. (2023), o plantio de leguminosas oferece vários serviços, além de habitat de forrageamento para as abelhas que polinizam as culturas integradas e produzem mel.

Nos sistemas de ILP, a polinização por abelhas é fundamental, pois grande parte das culturas dependem do processo da polinização para otimizar sua produção e favorecer o equilíbrio ecológico. Chakrabarti e Sagili (2024) descreveram a importância da utilização do uso comercial de abelhas melíferas e as estratégias para melhorar o forrageamento e manejo das abelhas nas lavouras, pois são altamente eficazes por serem adaptadas ao ambiente tropical.

Sistemas silvipastoris biodiversos podem ser constituídos de árvores que fornecem produtos florestais não madeireiros (PFNMs), como frutas, nozes, madeira nobre, lenha, entre outros produtos (Mackay-Smith et al., 2025). Esses sistemas podem proporcionar segurança alimentar e fontes adicionais de renda para pequenos produtores e famílias rurais (Bento et al., 2020).

14.2.1.4 Provisão de perfumes, óleos e outros extratos

Para o planejamento da intensificação ecológica, a busca por princípios agroecológicos enfatiza o uso de produtos secundários de árvores que podem ser extraídos sem a necessidade de derrubada de árvores (Picasso; Pizarro, 2024), incluindo os óleos essenciais passíveis de extração das folhas do eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) e os extratos vegetais usados em cosméticos ou tratamentos medicinais por maceração de folhas, flores, cascas ou raízes. Neste aspecto, Sharma et al. (2015) avaliaram o potencial do mutambo (*Guazuma tomentosa*) e seus efeitos farmacológicos associados, demonstrando que diferentes partes da planta, como folhas e raízes, têm sido usadas para tratar condições como disenteria, diarreia e problemas de próstata. Outros inúmeros estudos estão disponíveis na literatura sobre as propriedades medicinais e nutricionais de diferentes espécies de árvores, porém, o uso econômico ainda requer mais pesquisas, planejamento e uma cadeia consolidada para os diversos produtos (Yadav et al., 2019).

14.2.1.5 Recursos genéticos

A diversidade dos recursos genéticos é um conceito amplo que envolve os reinos animal, vegetal e microrganismos. Nos animais, inclui todas as espécies, raças e linhagens de interesse econômico, científico e cultural, para a humanidade na agricultura, para as gerações atuais e futuras. Os recursos vegetais envolvem as plantas nativas, cultivadas (variedades, cultivares) e outras espécies de interesse. Os microrganismos envolvem uma vasta diversidade de bactérias, fungos, vírus e outros.

Os sistemas integrados, especialmente os biodiversos, se destacam como uma estratégia eficaz para a conservação da diversidade dos recursos genéticos. Ao promoverem maior diversidade de espécies, oferecem maior diversidade de serviços ecossistêmicos, com consequente contribuição na conservação dos recursos genéticos (Mohammed, 2019; Yadav et al., 2019). Esses sistemas biodiversos toleram perturbações moderadas e podem contribuir com a conservação de germoplasma em seu ambiente natural. Algumas espécies de árvores, quando são incorporadas ao sistema de produção, aliviam a pressão sobre os ambientes naturais, como, por exemplo, na exploração de lenha e madeira (Yadav et al., 2019). Os SSP biodiversos também são benéficos para a biodiversidade da avifauna e fauna do solo (Mackay-Smith et al., 2025). Por sua vez, a conservação da diversidade dos recursos genéticos microbianos é essencial para o avanço e sustentabilidade dos sistemas agroalimentares (Zelaya-Molina et al., 2024), e estes podem ser considerados os engenheiros invisíveis do ambiente.

14.2.2 Serviços de regulação e manutenção

14.2.2.1 Qualidade do ar e clima

Inclui a capacidade dos ecossistemas de influenciar a composição atmosférica, a temperatura e os padrões climáticos. Sinergias são encontradas entre sequestro de carbono e produção de madeira (Lecegui et al., 2022). Em avaliações de SSP utilizando árvores de eucalipto, verificou-se que o sequestro de carbono foi suficiente para neutralizar a emissão de metano pela fixação do CO_2 eq em cerca 3,6 Unidades Animal (UA) por ha por ano (Silva et al., 2021; Brunetti et al., 2025). Neste aspecto, os bovinos podem atuar como um agente modulador do fluxo de nutrientes no sistema, desde que sejam adotadas estratégias que aumentem a eficiência do uso de nutrientes e minimizem as perdas, como o ajuste adequado da taxa de lotação em função da capacidade de suporte (Godara et al., 2024).

Em SSP com espécies leguminosas, Ibarra-Rondón et al. (2022) avaliaram a inclusão de 30% de forrageiras como leucena (*Leucaena leucocephala*), mutambo (*Guazuma ulmifolia*) e *Crescentia cujete* em uma dieta à base de gramínea (*Bothriochloa pertusa*). Os autores verificaram aumento do teor de proteína e diminuição do teor de fibra nas dietas, melhorando a digestibilidade da matéria seca, a produção de nitrogênio amoniacal e a dinâmica das variáveis dos parâmetros de fermentação ruminal, além de reduzir a produção de metano *in vitro* alimentar. Na dieta com leucena, a redução de metano foi maior devido à presença de taninos e o baixo conteúdo de fibra. Adicionalmente, Furtado et al. (2023) compararam um sistema de produção consorciado com a espécie arbustiva de feijão-guandu (*Cajanus cajan* cv. BRS Mandarim) e gramíneas tropicais (*Urochloa* spp.) com um sistema de pastagem extensiva. Verificaram melhor desempenho animal e redução de cerca de 70% na intensidade de emissão de metano, devido à estratégia de alimentação sazonal na época seca com o feijão-guandu.

As modificações microclimáticas provocadas pelas árvores em SSPs podem promover a regulação da temperatura e umidade do ar, o que associado com a redução da incidência da radiação solar proporcionam maior conforto térmico animal (Pezzopane et al., 2019).

14.2.2.2 Fluxos hídricos e controle de inundações

Abrange a capacidade dos ecossistemas de controlar o movimento da água, desde a infiltração até a prevenção de inundações.

Os sistemas silvipastoris contribuem com a redução do escoamento superficial por meio de múltiplos mecanismos, como a interceptação da chuva pelo dossel, aumento da permeabilidade e da rugosidade superficial do solo que retarda o movimento horizontal da água (Nicodemo; Primavesi, 2019). Além desses mecanismos, a diminuição do escoamento superficial da água pode ser reduzida pela diminuição da precipitação interna, uso de água e nutrientes pelas árvores, melhoria na qualidade do solo que aumenta a infiltração e sistemas radiculares que aumentam a infiltração. As raízes da vegetação lenhosa consistem num componente essencial para suporte das plantas, estabilidade e saúde do solo (Bosi et al., 2020). Esses meca-

nismos também contribuem para a estabilidade de áreas de encosta (Mackay-Smith et al., 2025). Porém, esses sistemas devem ser bem planejados para não ocorrer competição por água entre as espécies, principalmente durante a época seca.

Os sistemas ILP que apresentam melhoria na cobertura e estrutura do solo também colaboram para o equilíbrio do ciclo hidrológico, com consequente aumento na infiltração da água, redução do escoamento superficial, contribuindo com a recarga do lençol freático, mitigação do processo erosivo, reduzindo o risco de enchentes e favorecendo a mitigação das mudanças climáticas (Oliveira, 2024).

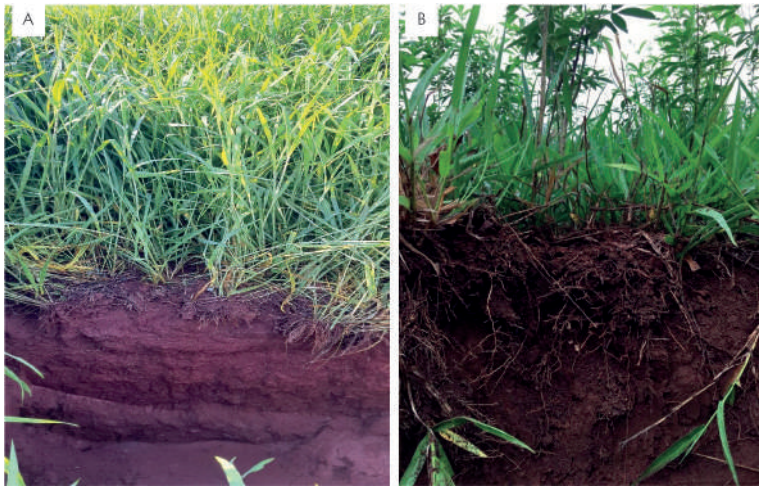
14.2.2.3 Qualidade do solo

A qualidade do solo é resultado de vários processos que se complementam, como a formação da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, biota do solo, que são vitais para sustentar as diversas espécies de plantas e ecossistemas. Dentre os processos que melhoram a qualidade dos solos, a matéria orgânica é primordial, pois aumenta a biota, atua na ciclagem de nutrientes e contribui com o sequestro de carbono no solo. Solos com elevados teores de matéria orgânica, geralmente apresentam boa porosidade e infiltração de água, sendo menos suscetível à compactação. Essa matéria é essencial para a retenção de nutrientes e o aumento da capacidade de troca catiônica, o que permite ao solo reter nutrientes disponíveis para as plantas e microrganismos (Cardoso, 2013; Notaro et al., 2014).

Quando o planejamento das árvores do SSP é adequado, a produtividade e fertilidade das pastagens pode superar os sistemas de monocultivo, pois as árvores proporcionam aumento da qualidade do solo por meio da serrapilheira, contribuindo com a manutenção da umidade do solo (De Macêdo Carvalho et al., 2024) e aumentando o sequestro de carbono tanto acima como abaixo do solo, funcionando como potenciais sumidouros de carbono (Schettini et al., 2021). Em SSP monoespecíficos, o sequestro de carbono depende de vários fatores, como o material genético e espaçamento. Schettini et al. (2021) compararam dois clones de eucalipto e verificaram que o espaçamento 6 m x 4 m (24 m^2 por planta) possui o maior potencial de estoque de C. Porém, para a produção de forrageiras e/ou lavoura, é importante definir o arranjo que possibilite adequada transmissão de radiação fotossinteticamente ativa (Pezzopane et al., 2024).

Além disso, a presença das árvores proporciona maiores teores de C, nitrogênio (N) e fósforo (P) na camada superficial do solo pela contribuição da liteira produzida, aumentando a matéria orgânica ligada aos minerais (MOM) (Hoosbeek, 2016), enquanto no subsolo há um aumento do C em razão de as raízes serem mais densas e profundas, contribuindo para os estoques de C a longo prazo (Tadini et al., 2021). A utilização de SSP biodiversos, com árvores nativas, mostrou-se superior na ciclagem de nutrientes, com maior aporte de nutrientes, em comparação com outros sistemas de produção, mostrando a importância da seleção de espécies no planejamento do sistema em função do objetivo. Nesse aspecto, a utilização de espécies arbóreas nativas como o baru (*Dipterex alata*), pequi (*Caryocar brasiliense*), cagaita (*Eugenia dysenterica*), *Gliricidia sepim* e *Mimosa caesalpiniifolia* e leguminosas lenhosas, por exemplo, a *Leucaena leucocephala*, contribuem para um aumento da fixação de nitrogênio e do teor de carbono orgânico e nutrientes no solo (Calil et al., 2016; Lira Júnior et al., 2020).

Há uma diversidade de arranjos espaço-temporal entre os componentes solo-planta e animal que proporcionam vários serviços, entre os quais a melhoria das propriedades do solo. As plantas de cobertura podem melhorar a maioria das propriedades físicas do solo, principalmente a longo prazo e quando associadas com plantio direto. A magnitude depende das características locais, melhorando a estabilidade dos agregados e a ciclagem de nutrientes do solo, a macroporosidade, a retenção de água, os estoques de C e N e reduz a compactação (Blanco-Canqui et al., 2013; Lima et al., 2023; Ferreira et al., 2024; Singh et al., 2024). O teor de matéria orgânica é um dos melhores indicadores sobre o manejo do solo, pois as práticas que aumentam o teor de matéria orgânica contribuem com a saúde do solo e resiliência do sistema de produção (Figura 14.9). Quando se adota a rotação de culturas, as mudanças das fontes de N melhoram a eficiência de N, principalmente quando se usa cultura de cobertura (Diacono; Montemurro, 2010). Dias et al. (2020) observaram que sistemas integrados de soja com as gramíneas *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés, *P. maximum* cv. Mombaça e o *P. maximum* cv. BRS Tamani, que possuem sistemas radiculares profundos e agressivos, proporcionaram maior reciclagem e extração de nutrientes, especialmente N e K, produzindo maior biomassa, com equivalentes de fertilizantes devolvidos ao solo.



Fotos: Sandra Aparecida Santos; Alberto Carlos de Campos Bernardi.

Figura 14.9. Sistema integração lavoura-pecuária (ILP) em arranjo rotacionado com o uso de *Urochloa ruziziensis* (A) e o consórcio de *Urochloa brizanta* cv. Piatã consorciada com *Cajanus cajan* (B).

Tadini et al. (2021, 2022) demonstraram que, além do aumento do conteúdo de carbono do solo nos sistemas integrados, também há um aumento em profundidade, e a natureza química desses compostos é muito mais estável, contribuindo para sua estabilização.

Além disso, durante a fase de pastejo no sistema, os animais funcionam como agentes catalíticos, ajudando a reciclagem da matéria orgânica, principalmente pelos arranjos ILP em rotação. Os nutrientes liberados pela decomposição dos excrementos e dos resíduos da pastagem, junto com os resíduos da produção agrícola, agem como um fertilizante natural. Isso enriquece a fertilidade do solo, especialmente quando o sistema inclui mais espécies cultivadas, diminui o revolvimento do solo e introduz animais (Pereira et al., 2023; Anghinoni; Vezzani, 2021; Tadini et al., 2022).

No entanto, o pisoteio do gado é uma das principais causas de compactação superficial (0-10 cm) em áreas de pastagem, podendo afetar a produtividade agrícola, a qualidade e quantidade da água (por reduzir a infiltração) e a saúde do ecossistema. Portanto, a presença constante de vegetação (incluindo culturas e árvores) é capaz de proteger o solo, criando canais que melhoram a aeração, a infiltração de água, a evaporação e o crescimento das raízes e, assim, reduzindo a compactação e promovendo um ambiente mais saudável para a microbiota do solo (Lima et al., 2025; Valani et al., 2025).

Lima et al. (2023) avaliaram a sucessão da cultura da soja com milho e capim paiaguás, ruziziensis e xaraés e verificaram que a implantação das forrageiras não prejudicaram a produtividade da soja, provavelmente devido à característica da cultivar e da disponibilidade regular de chuvas. Esta integração mostrou alto potencial de produzir biomassa de cobertura morta remanescente para lavouras subsequentes.

Sistemas integrados oferecem refúgios para a fauna de besouros rola-bosta. Ao cavar túneis e galerias (Figura 14.10A), eles contribuem com a aeração e permeabilidade do solo. Com a incorporação do esterco no solo, eles também contribuem com o aumento da área de pastagem e com a ciclagem de nutrientes (Giraldo et al., 2011). As populações de minhocas são sensíveis ao manejo do solo e úteis para avaliar os efeitos do ILPF na qualidade edáfica (Figura 14.10B). Os sistemas com árvores apresentaram maior abundância e biomassa de espécies do que os convencionais (Bruz et al., 2023).

Um detalhamento dos efeitos dos sistemas integrados nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo pode ser encontrado no Capítulo 6.

14.2.2.4 Doenças, pragas e habitats

Os sistemas de integração apresentam uma teia alimentar diversificada que contribui para o controle de pragas, doenças e parasitismo (Gusmão et al., 2020; Lira Júnior et al., 2020). Porém, ainda são necessários vários estudos sobre as sinergias e a dinâmica de compensações, de modo que esses conhecimentos possam subsidiar o processo de tomadas de decisão para a gestão sustentável e multifuncional desses

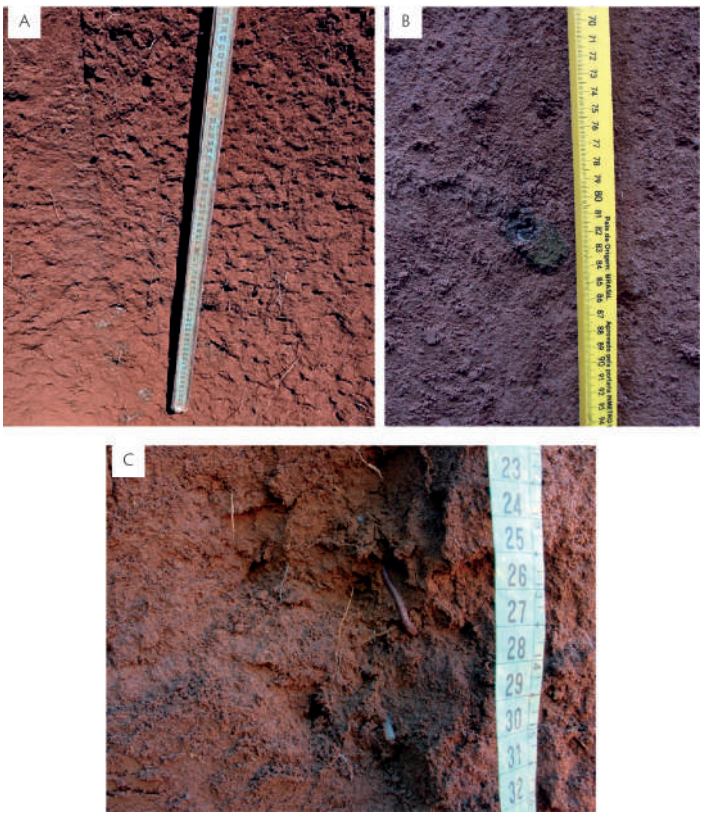


Figura 14.10. Trincheiras de pastagens mostrando galerias a 80 cm de profundidade feita pelo besouro rola-bosta (A), e minhoca (B).

sistemas (Picasso; Pizarro, 2024; Sandoval et al., 2023; Lecegui et al., 2022).

No caso de fitonematoides, que consiste num grande problema de diversas culturas, não existe um método isolado de controle, porém o manejo integrado de pragas e doenças (MIPD) pode ser eficaz (Avelino et al., 2019). Nesse sentido, o sistema ILP pode contribuir com a adoção do MIPD, pois envolve um conjunto de estratégias, como rotação de culturas e diversidade de espécies. Estudo recente mostrou que a cultivar BRS guatã de feijão-guandu controla principalmente nematoides *Pratylenchus brachyurus*, *P. zeae*, *Meloidogyne javanica* e *M. incógnita* (Embrapa, 2024) e tem sido indicada em sistemas ILP em rotação para reduzir o inóculo presente no sistema.

Entender como promover interações benéficas em sistemas biológicos pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de manejo agrícola mais sustentáveis, por exemplo: aumentar a biodiversidade vegetal por meio de faixas de flores silvestres é uma forma de atrair inimigos naturais das áreas de lavoura (Zytynska; Meyer, 2019). É importante também compreender a interação entre serviços ecossistêmicos (que agem de forma positiva) e desserviços (que agem de forma negativa) de um sistema para o desenvolvimento de estratégias de manejo de pragas positivas para a natureza (Kaushal et al., 2025). Em ILP, a rotação das culturas, principalmente com leguminosas, melhora a eficiência do uso da terra, a absorção de P e o risco de doenças no sistema radicular das culturas (Rauw et al., 2023).

A compreensão da ecologia de predadores de pragas para garantir que eles tenham recursos alimentares é de fundamental importância para estabelecer estratégias de controle de pragas. Os sistemas integrados consistem num ambiente diversificado que pode sustentar os inimigos naturais das pragas (Garbach et al., 2014). Os besouros rola-bosta, por exemplo, alimentam-se de fezes, beneficiam-se de sistemas integrados e podem predar as larvas de moscas e outros parasitas que se desenvolvem nas fezes, como a mosca-dos-chifres (Oliveira et al., 2017; Giraldo et al., 2011).

Há, também, a provisão de habitats, responsável pela manutenção saudável da biodiversidade, que contribui para a resiliência e as condições e recursos necessá-

rios para a vida e o desenvolvimento do ecossistema, de forma a manter o equilíbrio e a funcionalidade do sistema que, por sua vez, sustentam outros serviços (Figura 14.11). Neste aspecto, os sistemas integrados podem suportar diversos ecossistemas e promover habitat para uma diversidade de espécies (Ickowicz; Moulin, 2023). Estes devem ser planejados com espécies que proporcionem os serviços buscados, por exemplo, produção de forrageiras, sombra para os animais e habitat para a fauna nativa (Eggers et al., 2023).

A provisão de habitats é considerada um serviço de suporte em algumas classificações. Porém, na classificação de Common International Classification of Ecosystem Services (2013), é considerado serviço de regulação porque a manutenção da biodiversidade e a garantia de habitats saudáveis contribuem para a resiliência e o funcionamento dos ecossistemas, que, por sua vez, sustentam outros serviços. É a capacidade de o ambiente natural oferecer as condições e recursos necessários para a vida e o desenvolvimento da fauna, de forma a manter o equilíbrio e a funcionalidade do sistema. Provisão de habitat e abrigo, oferta de alimentos e água, regulação do ambiente, dispersão de sementes, controle biológico de pragas.

Diversas áreas agrícolas ou degradadas podem ser enriquecidas com a introdução de sistemas integrados multifuncionais, como é o caso de sistemas silvipastoris biodiversos. Estes devem ser planejados com espécies que proporcionem os serviços buscados, como produção de forrageiras, sombra para os animais e habitat para a fauna nativa (Eggers et al., 2023). Os sistemas silvipastoris aumentam a conectividade da paisagem, beneficiando algumas espécies (Mackay-Smith et al., 2025). O **Capítulo 11** apresenta um detalhamento sobre a biodiversidade de artrópodes nos sistemas integrados.

14.2.2.5 Polinização

A polinização é um serviço de regulação relevante para a reprodução de plantas e produção de frutos e sementes que beneficia as espécies vegetais presentes no sistema (Pires; Maués, 2020). Este serviço depende da diversidade das espécies presentes com florações em diferentes épocas do ano, pois oferece uma fonte contínua de néctar e pólen para os polinizadores, como abelhas (nativas e exóticas), borboletas, mariposas, beija-flores e até mesmo alguns mamíferos e morcegos (Harris et al., 2016). Esta biodiversidade é crucial para uma polinização efetiva das culturas (Miñarro et al., 2018). Nas regiões tropicais, mais de 90% das espécies vegetais dependem, em algum grau, desses animais para a polinização (Pires; Maués, 2020). As abelhas são vitais para a polinização de aproximadamente 70% das culturas alimentares em todo o mundo, tornando-as essenciais para as economias agrícolas (Chakrabarti; Sagili, 2024). Diversas tecnologias de polinização automatizada estão sendo desenvolvidas, incluindo o uso de drones e sistemas robó-



Figura 14.11. Sistema silvipastoril (SSP) proporciona habitat para diversas espécies da avifauna.

ticos para complementar ou substituir a polinização natural (Broussard et al., 2023).

Em SSP, a inclusão de espécies leguminosas em pastagens (consorciação gramínea-leguminosa), promovida para melhorar os serviços ecossistêmicos fornecidos por polinizadores, é bem conhecida, mas a sua adoção ainda é baixa, provavelmente por causa da baixa disponibilidade de sementes de leguminosas no mercado. A grande diversidade de espécies de leguminosas tropicais com diferentes períodos de floração permite o planejamento de SSP com forrageamento apícola durante o ano todo, como também aumenta a diversidade de polinizadores, pois fornece ambientes amigáveis aos polinizadores (Muir et al., 2017; Sanchez et al., 2021). Pode-se também planejar a complementaridade da floração de espécies lenhosas com herbáceas, revelando uma sinergia potencial entre o manejo das espécies de plantas e a conservação de abelhas raras (Ammann et al., 2024). Sanchez et al. (2021) descrevem uma lista de leguminosas herbáceas e arbóreas conhecidas por serem autopolinizadas e com maior cruzamento quando visitadas por diferentes espécies de abelhas, dentre as quais *Cajanus cajan*, *Leucaena leucocephala* e *Stylosanthes* spp. Os autores também apresentam várias soluções baseadas na natureza que fazem o uso de leguminosas na propriedade e paisagem, considerando o setor privado e público, com o intuito de facilitar os serviços de polinização aliados com a intensificação sustentável da pecuária e uso multifuncional, fortalecendo, também, a meliponicultura.

Nos sistemas ILP, a polinização por abelhas ainda é mais importante, pois grande parte das culturas dependem da polinização. Muitas das culturas como soja, milho, girassol, algodão, gramíneas, entre outras, são total ou parcialmente dependentes da polinização. A soja possui flores que podem se autopolinizar, mas a presença de abelhas que a visitam regularmente pode trazer uma série de benefícios que têm impacto na produtividade. Gazonni (2017) fez uma revisão bibliográfica sobre o processo de polinização na soja e sobre as interações entre a polinização por abelhas e o cultivo da soja, enfatizando que o recente aumento da produtividade depende de um manejo eficiente da cultura. Segundo Santone et al. (2022), a produtividade da soja pode ser reduzida de 13% a 25% quando os polinizadores são excluídos. Chakrabarti e Sagili (2024) descreveram a importância da utilização do uso comercial de abelhas melíferas e as estratégias para melhorar o forrageamento e manejo das abelhas nas lavouras

14.2.3 Cultural

Os serviços culturais são difíceis de quantificar, pois não representam fenômenos biofísicos e, quando avaliados, podem receber valores diferentes conforme a parte interessada (Ryschawy et al., 2019), além de serem dinâmicos, o que torna seu uso menos frequente (Falkowski; Diemot, 2021). Segundo o Common International Classification of Ecosystem Services (2025), os principais serviços envolvem:

- **Interações físicas e intelectuais com o ambiente:** Inclui oportunidades para recreação, lazer, educação e pesquisa científica que dependem da presença e do contato com os ecossistemas.
- **Interações não físicas e intelectuais com o ambiente:** Abrange valores espirituais, inspiração estética, herança cultural e o senso de lugar que os ecossistemas proporcionam.

Com relação à educação, os sistemas multidiversos e multifuncionais podem servir como infraestrutura para educação e preservação do conhecimento. A diversidade desses sistemas contribui para o incremento da fauna local. Os sistemas silvipastoris se assemelham às savanas parques e têm um valor estético muito apreciado pelos homens, com um valor turístico, assim como espiritual (Pent; Fike, 2021). Esses sistemas podem servir de ambientes para desenvolver práticas culturais em termos de manutenção do conhecimento tradicional, serviços de recreação e ecoturismo e patrimônio cultural. Os sistemas com árvores nativas tendem a ter maior valor cultural do que árvores exóticas (Mackay-Smith et al., 2025).

14.3 PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) foi instituído com a Lei n. 14.119/2021 – Política Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais (Brasil, 2021). Consiste numa ferramenta econômica que oferece compensações financeiras para quem adota práticas sustentáveis e seguem políticas ambientais que trazem benefícios ao meio ambiente. No âmbito do Direito Ambiental, o conceito de Protetor-Recebedor tem sido usado de maneira análoga ao princípio do Poluidor-Pagador previsto no Direito Internacional Público de

1992, ou seja, o poluidor deveria cobrir os custos dos danos ambientais causados e o protetor deveria ser compensado pelos esforços de conservação e proteção do meio ambiente por meio de recursos financeiros ou não. A lei estabelece que os pagadores de serviços ambientais podem incluir o poder público, organizações da sociedade civil ou agentes privados, sejam eles pessoas físicas ou jurídicas, de âmbito nacional ou internacional. O monitoramento nos programas de PSA devem ser transparentes perante a sociedade (Saúma Júnior; Andrade, 2024). Os programas de PSA têm sido debatidos ativamente em vários fóruns nacionais e internacionais, mostrando a preocupação crescente com o desenvolvimento sustentável.

Os sistemas de PSA são variados em função da diversidade de ecossistemas existentes no Brasil e a sua implantação ainda consiste em um grande desafio. Vários estados e municípios brasileiros têm seus próprios programas de PSA, com foco na conservação de bacias hidrográficas, conservação da biodiversidade e recuperação de áreas degradadas. Como o PSA prioriza práticas e tecnologias que protegem e restauram os ecossistemas por meio do uso sustentável da terra, os sistemas de ILPF se alinham perfeitamente a esses objetivos, o que pode abrir a porta para o produtor receber pagamentos, especialmente aqueles desenhados para maximizar os serviços ambientais. Raes et al. (2017) avaliaram a percepção de produtores rurais no Equador em relação ao PSA para sistemas integrados e concluíram que a adoção seria incentivada se os contratos dos projetos fossem atrelados ao PSA. Tosto et al. (2023) descreveram detalhadamente as fases de estruturação e implantação de PSA, destacando a importância do diagnóstico e monitoramento.

Pesquisas da Embrapa destacam implementações bem-sucedidas, como sistemas florestais que contribuem para a neutralização do metano, demonstrando os benefícios duplos de ganhos ambientais e econômicos (Brunetti et al., 2025; Castagnara et al., 2024).

14.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas integrados envolvem interações entre animais, plantas, solos e aspectos climáticos, o que torna crucial adotar abordagens sistêmicas que considerem a integração de todas as práticas de manejo que contribuam para o alcance de serviços de provisão e demais serviços em prol da sustentabilidade. São modelos de sistemas multifuncionais que, além de produzir os serviços de *commodities*, também oferecem serviços não *commodities*, contribuindo para a sustentabilidade da propriedade.

Mensurar os serviços ecossistêmicos de regulação de nutrientes e água proporcionados por sistemas como o ILPF é fundamental para quantificar seus benefícios ambientais e econômicos, além de auxiliar na tomada de decisões de manejo e políticas públicas. Existem diversas abordagens e métodos para realizar essa mensuração, que podem variar em termos de complexidade, custo e escala de aplicação.

Sistemas integrados vêm sendo aprimorados para aumento da multifuncionalidade por meio de práticas sustentáveis/regenerativas, contribuindo para a conservação de múltiplos serviços ambientais em prol de um planeta mais saudável.

14.5 REFERÊNCIAS

AMMANN, L.; ZURBRÜGG, C.; KNOP, E.; ALBRECHT, M. Spatio-temporal complementarity of floral resources sustains wild bee pollinators in agricultural landscapes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 359, 2024, e108754. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108754.

ANDRADE, C. M. G.; GOMES, S. I.; RAVAGNANI, M. A. S. S.; ALMEIDA, E. L. Silvopastoral systems for energy generation. In: BASSO, T. P.; BASSO, T. O.; BASSO, L. C. (eds.). Biotechnologicals applications of biomass. Londres: IntechOpen, 2021. DOI: http://doi.org/10.5772/intechopen.98844.

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic Soil Fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0210090, 2021. DOI: http://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210090.

ARAÚJO FILHO, J. A. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Recife, PE: Projeto Dom Helder Camara, 2013. 200 p. Disponível em: https://bibliotecasemiaridos.ufv.br/handle/123456789/180. Acesso em: 15 ago. 2025.

ARAÚJO, L. M.; SANTOS, L. A. C.; PACHECO, A. R.; CALIL, F. N.; SILVA-NETO, C. M. O gênero Eucalyptus como componente arbóreo em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF): uma análise bibliométrica. **Scientia Forestalis**, v. 51, n. e4031, p. e4031, 2023. DOI: http://doi.org/10.18671/scifor.v51.30.

ASSAD, E. D. Sistemas agrícolas adaptados às mudanças climáticas. **Ciência e Cultura**, v. 1, p. 35-39, 2021. DOI: https://doi.org/10.21800/2317-66602021000100010.

AVELINO, A. C. D.; FARIA, D. A.; OLIVEIRA, L. D.; TERZI, B. G.; CONTRERAS FILHO, A. S.; AFONSO, M. F.; RONDON, O. H. S.; ARIEIRA, G. O.; ABREU, J. G.; PEIXOTO, W. M.; ROSSI, M. Phytonematodes in Integrated Crop-livestock Systems of Tropical Regions. **Journal of Experimental Agriculture**

International, v. 37, n. 4, p. 1-13, 2019. DOI: http://doi.org/10.9734/jeai/2019/v37i430275.

BENTO, G. P.; FILHO, A. L. S.; FAITA, M. G. Sistemas silvipastoris no Brasil: uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e7019109016, 2020. DOI: http://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9016.

BLANCO-CANQUI, H.; HOLMAN, J. D.; SCHLEGEL, A. J.; TATARKO, J.; SHAVER, T. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: effects on soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 3, p. 1026-1034, 2013. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0400.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 429-440, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-019-00402-7.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis n os 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**: seção 1, n. 9, p. 7, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm. Acesso em: 15 ago. 2025.

BROUSSARD, M. A.; COATES, M.; MARTINSEN, P. Artificial pollination technologies: a review. **Agronomy**, v. 13, n. 5, 2023, e1351. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13051351.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: Enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, p. 104277, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104277.

BRUZ, L. S. M.; SANTOS, A.; DEMETRIO, W. C.; DE FREITAS PRIMO, D.; FELICIANO, L. P.; FERNANDES, C. H.; BARTZ, M. L. C.; DE CAMPO BERNARDI, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BROWN, G. G. Earthworms in various agricultural and forest ecosystems in São Carlos-SP, Brazil. **Zootaxa**, v. 5255, n. 1, p. 324-335, 2023. DOI: http://doi.org/10.11646/zootaxa.5255.1.26.

CABRAL, C. E. A.; BARROS, L. V.; ABREU, J. G.; SILVA, F. G.; CABRAL, C. H. A.; BEHLING NETO, A.; ANDRADE, F. C. F.; SALES, K. C.; HERRERA, D. M.; DELLARMELINDA, T. M. M. Marandu palisade grass intercropped with densely spaced teak in silvopastoral system. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 2075-2082, 2017. DOI: http://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4p2075.

CALIL, F. N.; LIMA, N. L.; SILVA, R. T.; MORAES, M. D. A.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; BRANDAO, D. C.; SILVA-NETO, C. M.; CARVALHO, H. C. S.; NASCIMENTO, A. R. Biomass and nutrition stock of grassland and accumulated litter in a silvopastoral system with Cerrado species. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 38, p. 3701-3709, 2016. DOI: http://doi.org/10.5897/AJAR2016.11369.

CARDOSO, E. J. B. N. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 219-303, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009.

CHAKRABARTI, P.; SAGILI, R. **Managed foraging for honey and crop pollination** – honey bees as livestock. In: The foraging behavior of the honey bee (*Apis mellifera*, L.). [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 175-193. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91793-3.00002-X.

CASTAGNARA, D. D.; GARCEZ, K. F.; UNAMUZAGA, L. V. G.; SCHNEIDER, C. R.; MATTEI, E.; RAMÃO, É. A. M.; VALENÇA, G. M.; BRAGANÇA, L. F.; RAMÃO, C. J.; KROLOW, R. H.; DE OLIVEIRA, P. S. R.; PINTANEL, J. B. A. **Crop-livestock integration in Brazilian lands**. [S.l.]: Seven Editora, 2024. p. 385-410. Disponível em: https://sevenpubl.com.br/editora/article/view/5691. Acesso em: 18 mar. 2026.

Common International Classification of Ecosystem Services. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): consulta sobre a versão 4, agosto-dezembro de 2012**. Nottingham: Centro de Gestão Ambiental, 2013. Disponível em: http://cices.eu/content/uploads/sites/8/2015/09/CICES-V4-3--17-01-13a.xlsx. Acesso em: 15 ago. 2025.

Common International Classification of Ecosystem Services. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 Guidance on the Application of the Revised Structure**. Nottingham: CICES, 2025. Disponível em: www.cices.eu. Acesso em: 15 ago. 2025.

COSTANZA, R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability. **Ecosystem Services**, v. 43, p. 101096, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101096.

DE MACÊDO CARVALHO, C. B.; DE MELLO, A. C. L.; DA CUNHA, M. V.; DE OLIVEIRA APOLINÁRIO, V. X.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; DA SILVA, V. J.; SILVA MEDEIROS, A.; IZIDRO, J. L. P. S.; BRETAS, I. L. Ecosystem services provided by silvopastoral systems: a review. **The Journal of Agricultural Science**, v. 162, p. 417-432, 2024. DOI: https://doi.org/10.1017/S0021859624000595.

DIACONO, M.; MONTEMURRO, F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 30, n. 2, p. 401-422, 2010. DOI: http://doi.org/10.1051/agro/2009040.

DIAS, M. B. C.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; BILEGO, U. O.; NETO, A. E. F.; ALMEIDA, D. P.; BRAND, S. C.; VILELA, L. Brachiaria and Panicum maximum in an integrated crop–livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. **Journal of Agricultural Science**, v. 158, n. 3, p. 206-217, 2020. DOI: http://doi.org/10.1017/S0021859620000532.

EGGERS, J.; DAVIS, S.; DOSCHER, C.; GREGORINI, P. Enhancing multifunctionality in agricultural landscapes with native woody vegetation. **Sustainability**, v. 15, n. 14, p. 11295, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/su151411295.

EMBRAPA. **Nova variedade de feijão guandu inibe nematoides e auxilia na alimentação animal**. 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/96460433/nova-variedade-de-feijao-guandu-inibe-nematoides-e-auxilia-na-alimentacao-animal. Acesso em: 18 mar. 2026.

FALKOWSKI, T. B.; DIEMONT, S. A. W. Cultural ecosystem services in agroforests. In: **Agroforestry: biodiversity, ecosystem services and sustainability**. Cham: Springer, 2021. p. 361-387. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-76562-9_16.

FERREIRA, C. D. S.; TAVARES, R. L. M.; PAIVA FILHO, S. V.; CANTÃO, V. C. G.; SIMON, G. A.; ALVES, J. M.; NASCIMENTO, H. L. B.; BILEGO, U. O. Stock of carbon and soil organic fractions in no-tillage and crop– livestock integration systems. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 3025, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/su16073025.

FURTADO, A. J.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNO, J. F.; NETO, R. P.; LOBO, A. A. G.; DA SILVA, G. V.; JUNIOR, F. P.; ALVES, T. C.; BERNDT, A.; DE FARIA PEDROSO, A.; DE MEDEIROS, S. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Pigeon Pea Intercropped with Tropical Pasture as a Mitigation Strategy for Enteric Methane Emissions of Nellore Steers. **Animals**, v. 13, n. 1323, p. 1323, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/ani13081323.

GARBACH, K.; MILDER, J. C.; MONTENEGRO, M.; KARP, D. S.; DE CLERCK, F. A. J. Biodiversity and ecosystem services in agroecosystems. In: **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**. [S.l.]: Elsevier, 2014. v. 2, p. 21-40. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00013-9.

GAZONNI, D. L. **Soja e abelhas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 151 p.

GHAFFARIYAN, M. R.; BROWN, M. Modelling timber offcuts utilisation: a case study in Victoria, Australia. **Silva Balcanica**, v. 26, n. 1, p. 81-90, 2025. DOI: http://doi.org/10.3897/silvabalcanica.26.e141696.

GIRALDO, C.; ESCOBAR, F.; CHARÁ, J. D.; CALLE, Z. The adoption of silvopastoral systems promotes the recovery of ecological processes regulated by dung beetles in the Colombian Andes. **Insect Conservation and Diversity**, v. 4, n. 2, p. 115-122, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2010.00112.x.

GODARA, A.S.; SARESH, N. V.; BIJARNIA, A. L.; GODARA, R. S.; KUMAR, D.; MEENA, D.; KUMAR, M. Integrating Livestock with Crops and Forestry for Sustainability. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, n. 11, p. 83-90, 2024. DOI: http://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i114530.

GUIMARÃES, F. S.; CIAPPINA, A. L.; ANJOS, R. A. R.; SILVA, A.; PELÁ, A. Consórcio guandu-milho-braquiária para integração lavoura pecuária. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, p. 22-27, 2017.

GUSMÃO, M. R.; OLIVEIRA, M. C. S.; NICODEMO, M. L. F.; PEZZOPANE, J. R. M. Insect richness in dung patches of cattle raised in two livestock systems. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 1, p. 9-17, 2020. DOI: http://doi.org/10.32404/rean.v7i1.4033.

HARRIS, A.; BRAMAN, S. K.; PENNISI, S. V. Influence of Plant Taxa on Pollinator, Butterfly, and Beneficial Insect Visitation. **HortScience**, v. 51, n. 8, p. 1016-1019, 2016. DOI: http://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.8.1016.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. B. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure**. Fabis Consulting, 2018. Disponível em: https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2018/01/Guidance-V51-01012018.pdf. Acesso em: 18 mar. 2026.

HEIN, L.; BAGSTAD, K.; EDENS, B.; OBST, C.; DE JONG, R.; LESSCHEN, J. P. Defining ecosystem assets for natural capital accounting. **PLoS One**, v. 11, n. 11, p. e0164460, 2016. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0164460.

HOMEM, B. G. C.; OLIVEIRA, S. G.; PEDREIRA, M. S.; PAULINO, M. F.; VALADARES FILHO, S. C.; DETMANN, E. Forage peanut legume as a strategy for improving beef production without increasing livestock greenhouse gas emissions. **Animal**, v. 18, 2024, e101158. DOI: https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101158.

HOOSBEEK, M. R. Elevated CO_2 increased phosphorous loss from decomposing litter and soil organic matter at two FACE experiments with trees. **Biogeochemistry**, v. 127, p. 89-97, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s10533-015-0169-1.

IBARRA-RONDÓN, A. J.; FRAGOSO-CASTILLA, P. J.; GIRALDO-VALDERRAMA, L. A.; MOJICA-RODRÍGUEZ, J. E. Effect of tropical forage species in silvopastoral arrangements on methane production and in vitro fermentation parameters in a RUSITEC system. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 35, n. 4, p. 217-232, 2022. DOI: http://doi.org/10.17533/udea.rccp.v35n4a02.

ICKOWICZ, A.; MOULIN, C. H. Family-run ruminant grazing systems in Mediterranean and tropical areas and the challenges of sustainable development. In: ICKOWICZ, A.; MOULIN, C. H. (ed.). **Livestock grazing systems and sustainable development in the Mediterranean and tropical areas**. Versalhes: Éditions Quæ, 2023. DOI: https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3693-0.

KAUSHAL, M.; ATIENO, M.; ODJO, S.; BAIJUKYA, F.; GEBREHAWARYAT, Y.; FADDA, C. Nature-Positive Agriculture—A Way Forward Towards Resilient Agrifood Systems. **Sustainability**, v. 17, n. 1151, p. 1151, 2025. DOI: http://doi.org/10.3390/su17031151.

LECEGUI, A.; OLAIZOLA, A. M.; VARELA, E. Disentangling the role of management practices on ecosystem services delivery in Mediterranean silvopastoral systems: synergies and trade-offs through expert-based assessment. **Forest Ecology and Management**, v. 517, p. 120273, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120273.

LEITE, L. F. C.; ARRUDA, F. P.; COSTA, C. N.; FERREIRA, J. S.; HOLANDA NETO, M. R. Chemical quality of soil and dynamics of carbon under monoculture and intercroping of acrocomia palm and pasture. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental**, v. 17, n. 12, 2013. Disponível em: link.gale.com/

apps/doc/A442117082/IFME?u=anon~77512d79&sid=googleScholar&xid=1a87a097. Acesso em: 15 ago. 2025.

LIMA, H. N. B.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; MELLO, A. C. L.; LIRA, M. A.; CUNHA, M. V.; DE FREITAS, E. V.; APOLINÁRIO, V. X. D. O. Herbage responses of signalgrass under full sun or shade in a silvopasture system using tree legumes. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1839-1848, 2020. DOI: http://doi.org/10.1002/agj2.20137.

LIMA, J. D. P.; TORINO, A. B.; SILVA, L. M.; NASCIMENTO JÚNIOR, L. F.; BRITO, M. F.; COSTA, K. A. P.; SILVA, B. M.; SEVERIANO, E. C. Crop-livestock integration improves physical soil, agronomic and environmental aspects in soybean cultivation. **Plants**, v. 12, n. 21, p. 3746, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/plants12213746.

LIMA, J. D. P.; SILVA, J. F. G.; LINHARES, A. J. S.; COSTA, K. A. P.; FERREIRA, C. J. B.; SEVERIANO, E. C. Crop-livestock integration systems mitigate soil compaction and increase soybean yield. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 47, n. e69446, p. e69446, 2025. DOI: http://doi.org/10.4025/actasciagron.v47i1.69446.

LIRA JÚNIOR, M. A.; FERREIRA, J. S.; SILVA, M. B.; FRACETTO, G. G. M. Legume silvopastoral systems enhance soil organic matter quality in a subhumid tropical environment. Soil Science Society of America Journal, v. 84, n. 4, 2020. DOI: http://doi.org/10.1002/saj2.20106

MACKAY-SMITH, T. H.; SPIEKERMANN, R. I.; RICHARDS, D. R.; HARCOURT, N.; BURKITT, L. L. An integrative approach to silvopastoral system design: perspectives, potentials and principles. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 68, n. 2, p. 218-258, 2025. DOI: http://doi.org/10.1080/00288233.2023.2298922.

MARCHI, S. R.; MARQUES, R. F.; PEREIRA, M. R. R.; MARTINS, D. Supresión de malezas por leguminosas forrajeras en sistemas silvopastoriles y su efecto sobre las características químicas del suelo. **Bosque**, v. 43, n. 1, p. 23-32, 2022. DOI: http://doi.org/10.4067/S0717-92002022000100023.

MARTINS, D.; GONÇALVES, C. G.; SILVA JUNIOR, A. C. Coberturas mortas de inverno e controle químico sobre plantas daninhas na cultura do milho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 649-657, 2016. DOI: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160078.

MATTA, F. de P.; GODOY, R.; OLIVEIRA, P. P. A.; FERRAZ JÚNIOR, R. S. Row spacing for pigeon pea sowing and its influence on the recovery of degraded pasture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 59, e03516, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2024.v59.03516.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Overview of the Milliennium Ecosystem Assessment**. 2005. Disponível em: https://www.millenniumassessment.org/en/About.html. Acesso em: 15 ago. 2025.

MIÑARRO, M.; GARCÍA, D.; MARTÍNEZ-SASTRE, R. Impact of insect pollinators in agriculture: importance and management of their biodiversity. **Ecosistemas**, v. 27, n. 2, p. 81-90, 2018. DOI: http://doi.org/10.7818/ECOS.1394.

MOHAMMED, J. The role of genetic diversity to enhance ecosystem service. **American Journal of Biological and Environmental Statistics**, v. 5, n. 3, p. 46-51, 2019. DOI: http://doi.org/10.11648/j.ajbes.20190503.13.

MUIR, J. P.; TEDESCHI, L. O.; DUBEUX, J. C. B.; PETERS, M.; BURKART, S. Enhancing food security in Latin America with forage legumes, Aumentar a segurança alimentar na América Latina com leguminosas forrageiras. Arch. Latinoamerican. **Productions Animales**, v. 25, p. 113-131, 2017. Disponível em: https://hdl.handle.net/10568/96233. Acesso em: 15 ago. 2025.

MUNIZ, M. P.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; BILEGO, U. O.; VILELA, L.; DIAS, M. B. C.; OLIVEIRA, I. P.; ASSIS, L. F. A.; SOUZA, W. F.; RODRIGUES, R. C. Production, forage quality and cattle performance in Paiaguas palisadegrass and Tamani grasses in different forms of animal supplementation in crop-livestock integration. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 3, p. 381-388, 2022. DOI: http://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.03.p3413.

MURADIAN, R.; CORBERA, E.; PASCUAL, U.; KOSOY, N.; MAY, P. H. Reconciling theory and oractice: an alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1202-1208, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.006.

NARJES, M.; CARDOSO, J. A.; BURKART, S. Promoting forage legume–pollinator interactions: Integrating crop pollination management, native beekeeping and silvopastoral systems in tropical Latin America. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, n. 725981, p. 725981, 2021. DOI: http://doi.org/10.3389/fsufs.2021.725981.

NICODEMO, M. L. F. Orientações para plantio, colheita e comercialização de espécies florestais nativas da Mata Atlântica no Estado de São Paulo. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. 31 p. (Documentos, 127). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085025/1/Documentos127.pdf. Acesso em: 18 mar. 2026.

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVESI, O. M. A. Serviços ambientais em sistemas silvipastoris. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 141-153. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1112746. Acesso em: 15 ago. 2025.

NOTARO, K. A.; MARTINS, M. A.; SILVA, R. F.; SIQUEIRA, J. O. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 2, p. 87-95, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000200002.

OLIVARES-PÉREZ, J.; ROJAS-HERNÁNDEZ, S.; AVILÉS-NOVA, F.; CAMACHO-DÍAZ, L. M.; CIPRIANO-SALAZAR, M.; JIMÉNEZ-GUILLÉN, R.; QUIROZ-CARDOZO, F. Uses of Non-leguminous Trees in Silvopastoral Systems in the South of the State of Mexico. **Ecosistemas Recursos Agropecuarios**, v. 3, n. 8, p. 193-202, 2016.

OLIVEIRA, M. C.; NICODEMO, M. L. F.; GUSMÃO, M. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BILHASSI, T. B.; SANTANA, C. H.; GONÇALVES, T. C.; RABELO, M. D.; GIGLIOTI, R. Differential *Haematobia irritans* infestation levels in beef cattle raised in silvopastoral and conventional pasture systems. **Veterinary**

Parasitology, v. 246, p. 96-99, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.08.020.

OLIVEIRA, A. F.; MENEZES, G. L.; GONÇALVES, L. C.; ARAÚJO, V. E.; RAMIREZ, M. A.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; JAYME, D. G.; LANA, Â. M. Q. Pasture traits and cattle performance in silvopastoral systems with *Eucalyptus* and *Urochloa*: systematic review and meta-analysis. **Livestock Science**, v. 262, p. 104973, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104973.

OLIVEIRA, M. C. R. **Fatores que influenciam no armazenamento de água do solo sob sistemas integrados de produção agropecuária**. 2024. 32 f. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/79082/1/TFCE_%20Marcia_%20Ribeiro%20_2024_.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

PENT, J. G.; FIKE, J. K. Enhanced ecosystem services provided by silvopastures. In: UDAWATTA, R. P.; JOSE, S. (eds.) **Agroforestry and ecosystem services**. Cham: Springer, p. 141-171, 2021. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-80060-4.

PEREIRA, F.; MAXWELL, T. M. R.; SMITH, C. M. S.; CHARTERS, S.; MAZZETTO, A. M.; GREGORINI, P. Designing grazing systems that enhance the health of New Zealand high-country grasslands. **Cleaner Environments Systems**, v. 11, n. 100151, p. 100151, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100151.

PEZO, D.; RÍOS, N.; IBRAHIM, M.; GÓMEZ, M. Silvopastoral systems for intensifying cattle production and enhancing forest cover: the case of Costa Rica. Washington: World Bank, 2018.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; DIAS, H. B.; GONTIJO NETO, M. M.; XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 312, 2021, e107350. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. **Agroforestry Systems**, v. 98, p. 2013-2025, 2024a. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-024-01038-y.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; DIAS, H. B.; GONTIJO NETO, M. M.; XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015.

PEZZOPANE, J. R. M.; DE OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; NETO, R. P.; FURTADO, A. J.; RODRIGUES, P. H. M. Intercropping of Tropical Grassland and Pigeon Pea: Impact on Microclimate, Soil Water, and Forage Production. **Rangeland Ecology and Management**, v. 95, p. 1-10, 2024b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rama.2024.04.005.

PICASSO, V.; PIZARRO, D. Silvopastoral transitions in Latin America: toward diverse perennial systems. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2267-2272, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-024-01023-5.

PIRES, C. S. S.; MAUÉS, M. M. Insect pollinators, major threats and mitigation measures. **Neotropical Entomology**, v. 49, p. 469-471, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s13744-020-00805-7.

POTT, A.; POTT, V. J. Plantas nativas potenciais para sistemas agroflorestais em Mato Grosso do Sul. In: SEMINÁRIO SISTEMAS AGROFLORESTAIS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, Campo Grande. **Anais** [...]. Campo Grande: Embrapa, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Arnildo-Pott/publication/265268121_Plantas_Nativas_Potenciais_para_Sistemas_Agroflorestais_em_Mato_Grosso_do_Sul/links/54a142910cf267bdb902000c/Plantas-Nativas-Potenciais-para-Sistemas-Agroflorestais-em-Mato-Grosso-do-Sul.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

QUEIRÓZ, J. F.; MANESCHY, R. Q.; MARQUES, M. N. C. Modelos econômicos de sistemas silvipastoris com cercas vivas. **Cadernos de Agroecologia**, v. 10, n. 3, 2015. Disponível em: https://www.aba-agroecologia.org.br/revista/cad/article/view/17221. Acesso em: 15 ago. 2025.

RAES, L.; SPEELMAN, S.; AGUIRRE, N. Farmers' preferences for PES contracts to adopt silvopastoral systems in Southern Ecuador, revealed through a choice experiment. **Environmental Management**, v. 60, n. 2, p. 200-215, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/s00267-017-0876-6.

RAUW, W. M.; AMBROSIUS, J.; DE BOER, I. J. M.; VAN ZANTEN, H. H. E. Sustainable development in circular agriculture: an illustrative bee–legume–poultry example. **Sustainable Development**, v. 31, p. 639-648, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/sd.2435.

RIBASKI, J.; RIBASKI, S. A. G.; RIBASKI, N. G. Sistemas silvipastoris como estratégia de desenvolvimento rural sustentável para a região sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 12, n. 2, p. 9-18, 2023. DOI: http://doi.org/10.23900/2359-1552v12n2-2-2023.

RIBASKI, J.; LIMA, P. C. F.; OLIVEIRA, V. R.; DRUMOND, M. A. Sabiá (Mimosa caesalpiniaefolia): árvore de múltiplo uso no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 4 p. (Comunicado Técnico, 104).

RYSCHAWY, B.; DUMONT, B.; THEROND, O.; DONNARS, C.; HENDRICKSON, J.; BENOIT, M.; DURU, M. Review: An integrated graphical tool for analysing impacts and services provided by livestock farming. **Animal**, v. 13, n. 8, p. 1760-1772, 2019. DOI: http://doi.org/10.1017/S1751731119000351.

SALES-BAPTISTA, E.; FERREZ-DE-OLIVEIRA, M. I. Grazing in silvopastoral systems: multiple solutions for diversified benefits. **Agroforestry Systems**, v. 95, p. 1-6, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-020-00581-8.

SANCHEZ, M. E. N.; ARANGO, J. A. C.; BURKART, S. Promoting forage legume–pollinator interactions: integrating crop pollination management, native beekeeping and silvopastoral systems in Tropical Latin America. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, n. 725981, p. 725981, 2021. DOI: http://doi.org/10.3389/fsufs.2021.725981.

SÁNCHEZ-ROMERO, R.; MORA-ARDILA, F.; VAL-ARREOLA, D.; GONZÁLEZ-ESQUIVEL, C. E. Estimation of the forage potential of

trees in silvopastoral systems of a dry tropical forest in Jalisco, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 1, p. 129-145, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-021-00704-9.

SANDOVAL, D. F.; FLOREZ, J. F.; ENCISO VALENCIA, K. J.; SOTELO CABRERA, M. E.; STEFAN, B. Economic-environmental assessment of silvopastoral systems in Colombia: An ecosystem service perspective. **Heliyon**, v. 9, n. 8, p. e19082, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19082.

SANTONE, A.; MAZZEI, M. P.; VESPRINI, J.; TORRES, C.; AMARILLA, L. D.; GALETTO, L. Pollination servisse and soybean yields. **Acta Oecologica**, v. 116, n. 103846, p. 103846, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.actao.2022.103846.

SANTOS, S. A.; FEIDEN, A.; TOFFANI, M.; SALLIS, S. M. Sistemas silvipastoris naturais e alterados no Pantanal. **Cadernos de Agroecologia**, v. 4, n. 1, 2009. Disponível em: https://aba-agroecologia.org.br/revista/cad/article/view/3954. Acesso em: 15 ago. 2025.

SAÚMA JÚNIOR, A. S.; ANDRADE, M. M. Pagamento por serviços ambientais: legislação e perspectivas no Estado de Rondônia. **Revista Ibero-Americana de Humanidades**, v. 10, n. 11, 2024. DOI: https://doi.org/10.51891/rease.v10i11.16553.

SCHETTINI, B. L. S.; JACOVINE, L. A. G.; TORRES, C. M. M. E.; OLIVEIRA NETO, S. N.; ROCHA, S. J. S. S.; VILLANOVA, P. H.; ALVES, E. B. B. M.; RUFINO, M. P. M. X. Sistemas silvipastoris com eucalipto: estocagem de carbono em diferentes espaçamentos e clones. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 3, p. 1047-1062, 2021. DOI: http://doi.org/10.5902/1980509825281.

SHARMA, M.; CHOPRA, S.; PRASAD, S. B. Guazuma tomentosa: a valuable medicinal plant. International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research, v. 7, n. 1, p. 197-200, 2015. DOI: https://doi.org/10.22159/ijpps.2018v10i9.26778.

SINGH, A.; MIKHA, M. M.; BENNETT, J. M.; SINGH, S.; SCHMER, M. R. Soil profile carbon sequestration and nutrient responses varied with cover crops in irrigated forage rotations. **Soil and Tillage Research**, v. 238, 2024, e106020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106020.

SILVA, A. R.; FILHO, J. A. R.; CARVALHO, E. J. M.; SANTIAGO, A. V.; VELOSO, C. A. C.; MARTINEZ, G. B. Carbon stock and methane mitigation produced by cattle in a integrated livestock-forestry system (IPF) with eucalyptus in southeast Pará State. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39997-40016, 2021. DOI: http://doi.org/10.34117/bjdv7n4-457.

SKORUPA, L.; MANZATTO, V. Avaliação da adoção de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil. In: SKORUPA, L.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-florestas no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologias, avaliação da adoção e de impactos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. p. 340-379.

SWARNAM, T. P.; VELMURUGAN, A. V.; PANDEY, S. K.; DAM ROY, S. Enhancing nutrient recovery and compost maturity of coconut husk by vermicomposting technology. **Bioresource Technology**, v. 207, p. 76-84, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.046.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN-NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil & Tillage Research**, v. 211, p. 105001, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2021.105001.

TADINI, A. M.; GORANOV, A. I.; MARTIN-NETO, L.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; HATCHER, P. G. Structural characterization using 2D NMR spectroscopy and TMAH-GC × GC-MS: Application to humic acids from soils of an integrated agricultural system and an Atlantic native forest. **The Science of the Total Environment**, v. 815, p. e152605, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152605.

TOSTO, S. G.; GARCIA, J. R.; GARCIA, E. P. A.; ALMEIDA, V.; SARCINELLI, O.; PEREIRA, L. C.; GOMES, M. A. F. Pagamentos por serviços ambientais. In: TOSTO, S.G.; PEREIRA, L. C.; GOMES, M. A. F.; RODRIGUES, J. A. (ed.). Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono – Amazônia. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 182-200. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1157743. Acesso em: 15 ago. 2025.

TUI, S. H. K.; DESCHEEMAEKER, K.; VALDIVIA, R. O.; MASIKATI, P.; SISITO, G.; MOYO, E. N.; CRESPO, O.; RUANE, A. C.; ROSENZWEIG, C. Climate change impacts and adaptation for dryland farming systems in Zimbabwe: a stakeholder-driven integrated multi-model assessment. **Climatic Change**, v. 168, n. 1-2, art. 112, 2021. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03151-8.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; MACHADO, C. B.; DUARTE, D. A.; BRITO, M. F. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; GIMÉNEZ, D.; COOPER, M. Soil porosity in integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol assessed by 3D X-ray computed tomography. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 237, p. 110557, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110557.

YADAV, A.; GENDLEY, M. K.; SAHU, J.; PATEL, P. K.; CHANDRAKER, K.; DUBEY, A.. Silvopastoral system: a prototype of livestock agroforestry. **The Pharma Innovation Journal**, v. 8, n. 2, p. 76-82, 2019.

ZELAYA-MOLINA, L. X.; CHÁVEZ-DÍAZ, I. F.; RAMOS-GARZA, J.; FAJARDO-FRANCO, M. L.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, C. Agriculture assisted by microbial genetic resources:current and future scenarios. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 6, n. 100222, p. 100222, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100222.

ZYTYNSKA, S. E.; MEYER, S. T. Effects of biodiversity in agricultural landscapes on theprotective microbiome of insects – a review. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 167, n. 1, p. 2-13, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/eea.12751.

Capítulo 15

Geotecnologias

José Ricardo Macedo Pezzopane, Danilo Serra da Rocha,
José Otavio de Almeida Bueno, Pedro Henrique de Godoy Fernandes,
Luiza Campos Giglio, Alberto Carlos de Campos Bernardi



RESUMO: O uso de geotecnologias tem promovido avanços significativos na análise e gestão da agropecuária. Na Embrapa Pecuária Sudeste, destacam-se aplicações do sensoriamento remoto (orbital, aéreo e proximal) e de sistemas de informações geográficas (SIG), que englobam técnicas de geoprocessamento e geoestatística voltadas ao monitoramento de atributos do solo, da vegetação e do microclima em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). O sensoriamento remoto orbital tem sido empregado na estimativa da produtividade vegetal, da temperatura de superfície e do vigor da vegetação, por meio de índices espectrais (como NDVI e NDRE) e de modelos agrometeorológicos-espectrais. O uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) equipados com câmeras RGB, ou sensores LiDAR, tem possibilitado a geração de modelos digitais de terreno e de altura, bem como a caracterização estrutural de árvores e pastagens. No sensoriamento proximal, sensores ópticos e elétricos permitem a coleta de dados sob a copa das árvores e a delimitação de zonas de manejo a partir de informações coletadas no solo. SIGs e técnicas de interpolação, como krigagem e IDW, têm viabilizado a espacialização de variáveis contínuas, gerando informações sobre a transmissão de radiação solar sob a copa, propriedades do solo, correção e adubação, lotação animal e conforto térmico, considerando a variabilidade espaço-temporal. A integração dessas tecnologias tem contribuído para o uso eficiente de recursos, o aumento da produtividade, a sustentabilidade dos sistemas e a adaptação às mudanças climáticas, consolidando a importância das geotecnologias nos sistemas integrados de produção agropecuária.
Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica (SIG); Sensoriamento Remoto; Sensoriamento Proximal; Geoestatística; Geoprocessamento; Variabilidade Espacial.

ABSTRACT: The use of geotechnologies has promoted significant advances in the analysis and management of agriculture. At Embrapa Pecuária Sudeste, the applications of remote sensing (orbital, aerial, and proximal) and geographic information systems (GIS) stand out, encompassing geoprocessing and geostatistical techniques aimed

https://doi.org/10.4322/9786586819427-15

at monitoring soil, vegetation, and microclimate attributes in integrated crop-livestock-forestry systems (ILPF). Orbital remote sensing has been used to estimate plant productivity, surface temperature, and vegetation vigor through spectral indices (such as NDVI and NDRE) and agrometeorological-spectral models. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with RGB cameras or LiDAR sensors has enabled the generation of digital terrain and height models, as well as the structural characterization of trees and pastures. In proximal sensing, optical and electrical sensors enable data collection under the tree canopy and the delimitation of management zones based on ground-collected information. GIS and interpolation techniques, such as kriging and IDW, have enabled the spatialization of continuous variables, generating information on solar radiation transmission under the canopy, soil properties, correction and fertilization, animal stocking rate, and thermal comfort, while accounting for spatiotemporal variability. The integration of these technologies has contributed to the efficient use of resources, increased productivity, the sustainability of systems, and adaptation to climate change, consolidating the importance of geotechnologies in integrated agricultural production systems.
Keywords: Geographic Information System (Gis); Remote Sensing; Proximal Sensing; Geostatistics; Geoprocessing; Spatial Variability.

15.1 INTRODUÇÃO

Geotecnologias são o conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica. Também conhecidas como geoprocessamento, dentre as tecnologias podem ser destacados os sistemas de informações geográficas, cartografia digital, sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global e a topografia (Rosa, 2005).

A equipe de pesquisa da Embrapa Pecuária Sudeste e seus parceiros têm empregado um conjunto avançado de geotecnologias nas pesquisas com sistemas integrados de produção pecuária. Essas tecnologias incluem: i) sensoriamento remoto aéreo que permite a coleta de dados da vegetação, uso do solo e ambiente de grandes áreas com satélites, veículos aéreos tripulados ou não; ii) sensoriamento proximal, voltado à obtenção de dados detalhados de solo e plantas; iii) sistemas de informações geográficas, integrando e analisando dados geoespaciais, transformando-os em mapas e modelos que subsidiam as tomadas de decisões; e iv) geoestatística, para compreender a variabilidade espacial dos atributos de solo e planta.

O uso dessas tecnologias tem permitido a geração de metodologias para a estimativa de parâmetros de solo e planta em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em substituição a métodos diretos, além do conhecimento da variabilidade espacial desses atributos, resultando em maior produtividade e sustentabilidade dos sistemas.

15.2 SENSORIAMENTO REMOTO

Adquirir informações sobre a superfície terrestre sem contato direto com o objeto de interesse, por meio da detecção e registro da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos alvos é denominado Sensoriamento Remoto – SR (Mulla, 2013; Jensen, 2009). As propriedades físico-químicas, estrutura e posição do objeto em relação à fonte incidente interferem nas frações de energia transmitida, refletida e absorvida.

No caso das imagens capturadas, independentemente da plataforma, elas possuem maior ou menor aplicabilidade em determinadas situações em função de alguns parâmetros dos sensores (Wang et al., 2025).

O SR permite o diagnóstico da variabilidade espacial e temporal de grandes extensões agrícolas, recebendo destaque devido aos avanços tecnológicos em resolução espacial e temporal de sistemas sensores orbitais, assim como pelo aumento da oferta de imagens orbitais por empresas comerciais (Houborg; McCabe,

- **Resolução espacial:** define o tamanho mínimo dos objetos detectáveis na imagem;
- **Resolução temporal:** determina a frequência com que um sistema sensor é capaz de imagear uma mesma área;
- **Resolução espectral:** refere-se à menor porção do espectro eletromagnético que um sistema sensor é capaz de segmentar;
- **Resolução radiométrica:** indica a capacidade do sensor de discriminar pequenas variações na energia detectada, dada pelo número de níveis digitais da imagem.

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2025).

2016). O comportamento espectral dos objetos é fundamental para a interpretação das imagens (Teillet; Staenz; William, 1997), pois cada material reflete, absorve e transmite a radiação eletromagnética de maneira distinta, dependendo de suas propriedades físicas e químicas. Essa resposta específica em diferentes comprimentos de onda gera o que se denomina assinatura espectral, a qual permite identificar e distinguir alvos como água, solo, vegetação e áreas urbanas (Sommer et al., 1998; Zhang; Kovacs, 2012).

A radiação captada pelos sensores está distribuída ao longo do espectro eletromagnético, abrangendo desde a região do ultravioleta (UV), passando pelo visível, infravermelho próximo (Nir) e infravermelho de ondas curtas (Swir), até as micro-ondas, utilizadas por sensores ativos (Mulla, 2013; Pinter Junior et al., 2003; Primicerio et al., 2012). Esse espectro é a base para o desenvolvimento de índices espectrais que auxiliam na interpretação dos dados obtidos por SR (Figura 15.1).

Os sensores utilizados na detecção do espectro eletromagnético são classificados quanto a sua fonte de energia, podendo ser denominados passivos ou ativos. Os sensores passivos, como câmeras ópticas e sensores multiespectrais, captam a radiação solar refletida pelas superfícies nos espectros visível (Vis, 400 a 700 nm), infravermelho próximo (Nir, 1.200 - 2.500 nm) e infravermelho térmico (Tir, 8.000 - 14.000 nm) (Almeida et al., 2025).

Os sensores ativos emitem seu próprio sinal e registram o retorno após interação com os alvos. Isso permite sua operação em qualquer horário e sob condições atmosféricas adversas, como nebulosidade (Almeida et al., 2025). Entre os principais destacam-se o LiDAR (Light Detection and Ranging) e o radar de abertura sintética (SAR) (Kuzelka et al., 2020; Wang et al., 2022; Wu et al., 2016). Os sensores LiDAR emitem pulsos de laser no infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (900 - 1.600 nm), medindo o

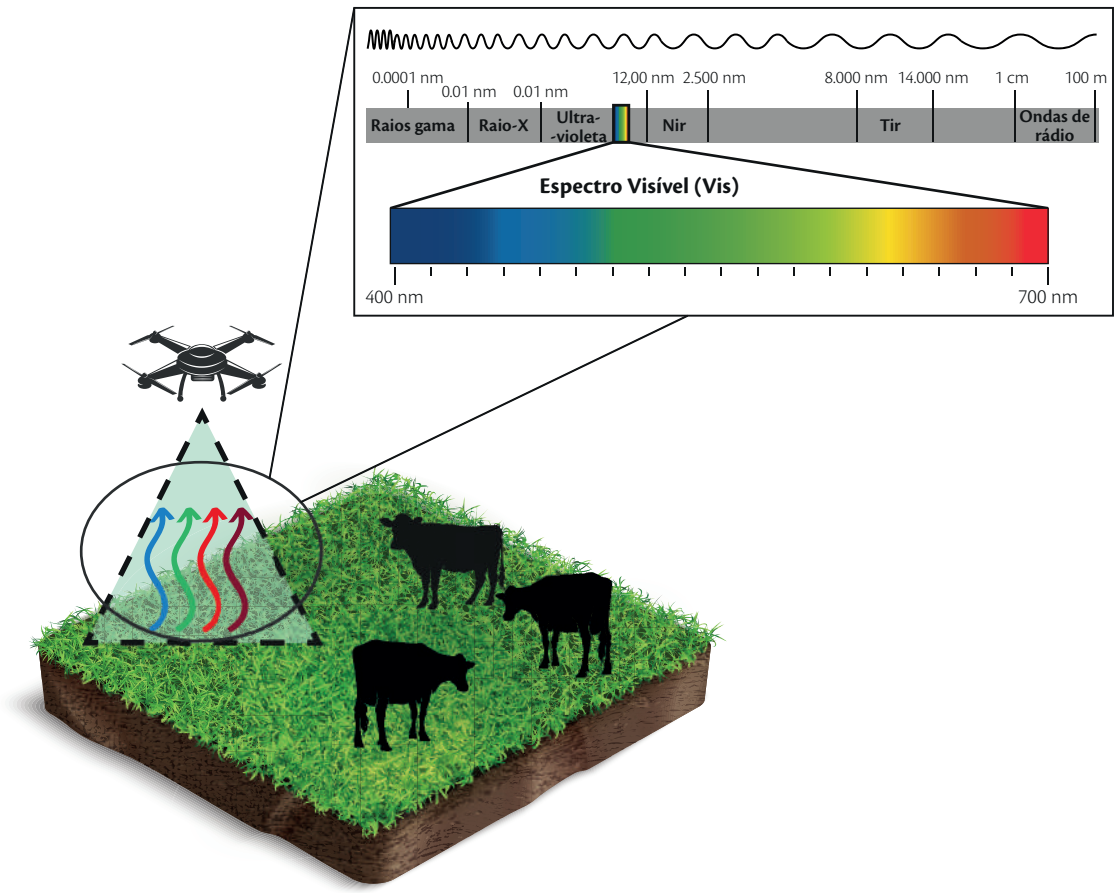


Figura 15.1. Espectro eletromagnético aplicado ao sensoriamento remoto.

tempo de retorno após o contato com superfícies para gerar modelos tridimensionais (Almeida et al., 2025).

Atualmente, os sensores podem ser acoplados a diversas plataformas, como satélites, aeronaves, aeronaves remotamente pilotadas e veículos aéreos não tripulados (ARPVANTs), máquinas agrícolas autopropelidas, entre outras (Mulla, 2013). Na Figura 15.2 é representada a escala de obtenção das informações da superfície terrestre com as diferenças entre resolução versus escala de cada uma das modalidades de obtenção.

Nesse contexto, desde o lançamento do Landsat-1 em 1972, os índices espectrais tornaram-se ferramentas muito úteis no SR, especialmente os índices de vegetação, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), utilizado para estimar a densidade, vigor e saúde da vegetação (Sishodia et al., 2020; Wulder et al., 2022). Este índice combina bandas do vermelho e do infravermelho próximo, permitindo avaliações padronizadas da cobertura vegetal em diferentes contextos, como agricultura, desmatamento e degradação de pastagens (Karnieli et al., 2010; Xue; Su, 2017).

Além do NDVI, outros índices têm sido aplicados conforme o objetivo da análise, como o NDRE (*Normalized Difference Red Edge*), relacionado à clorofila e teor de nitrogênio (Rodriguez et al., 2006); o Chl, focado no teor de clorofila (Gitelson et al., 2003); e o SRI, que reflete a quantidade de biomassa verde, o teor de pigmentos e estresse hídrico (Tucker, 1979). A Tabela 15.1 resume os principais índices utilizados, suas fórmulas e respectivas aplicações, servindo como referência prática para estudos de monitoramento da vegetação em áreas agrícolas e florestais.

Complementando essa abordagem, o uso de ARPs equipadas com câmeras RGB, multiespectrais, térmicas ou sensores LiDAR tem se destacado como alternativa mais acessível e versátil para aquisição de dados (Xue; Su, 2017). Elas oferecem flexibilidade operacional, baixo custo e alta resolução espacial, sendo ideais para aplicações em áreas de difícil acesso ou que demandam atualizações frequentes (Primicerio et al., 2012). O LiDAR pode ainda ser terrestre (Schneider et al., 2019) ou móvel (MLS – Mobile Laser Scanning) (Hyyppa et al., 2020).

Em escala ainda mais próxima da superfície tem-se o SR proximal que utiliza sensores no solo, muito próximos ao alvo, como espectrorradiômetros portáteis, sensores de clorofila e umidade instalados em hastes, tratores ou mesmo diretamente sobre o solo.

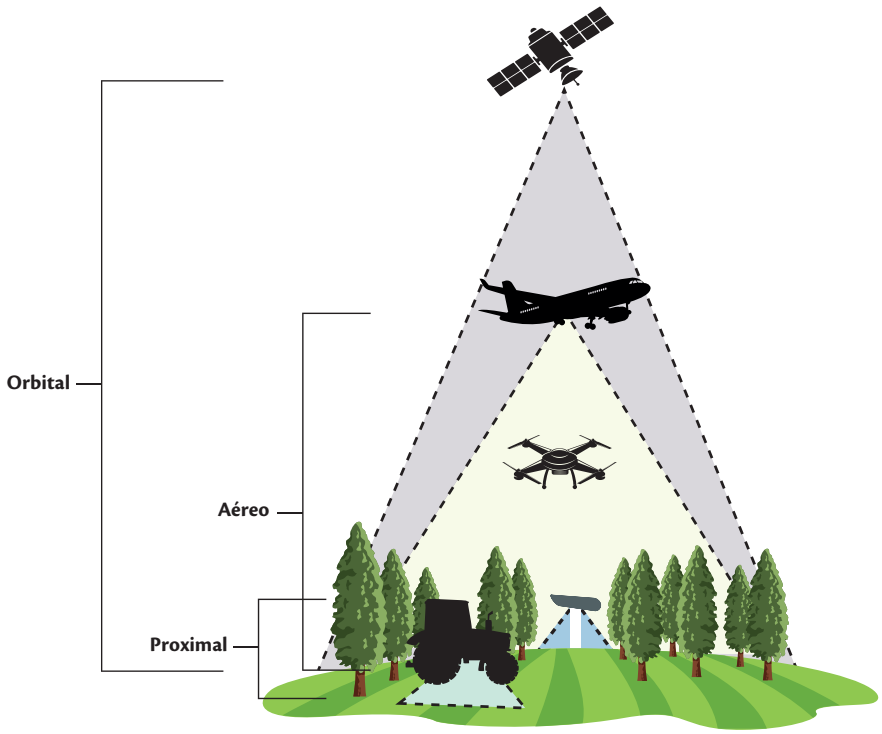


Figura 15.2. Ilustração com tipos de sensores utilizados no sensoriamento remoto.

Tabela 15.1. Descrição dos principais índices de vegetação aplicados em estudos de vegetação, com suas equações e indicações de uso conforme a literatura.

Índice	Equação	Descrição	Referência
NDVI	$NDVI = (Nir_{760} - Vis_{670})*(Nir_{760} + Vis_{670})^{-1}$	Normalized difference vegetation index ou Índice de diferença de vegetação normalizado, relacionado à quantidade de biomassa verde, teor e conteúdo de pigmentos e estresse hídrico.	Rouse et al. (1974)
NDRE	$NDRE = (Nir_{760} - Re_{720})*(Nir_{760} + Re_{720})^{-1}$	Normalized difference red edge ou diferença normalizada na banda do vermelho, relacionado aos teores de clorofila e N na biomassa.	Rodriguez et al. (2006)
Chl	$Chl = 1 - [(Nir_{760})*(Re_{720})^{-1}]$	Chlorophyll Index ou índice de clorofila, relacionado ao teor de clorofila	Gitelson et al. (2003)
SRI	$SRI = (Nir_{760})*(Vis_{670})^{-1}]$	Simple Ratio Index ou índice de relação simples, relacionado à quantidade de biomassa verde, teor e conteúdo de pigmentos e estresse hídrico.	Tucker (1979)
MSR	$MSR = 1-(Nir_{760} - Vis_{670})*[1+(Nir_{760} + Vis_{670})^{-0,5}]$	Modified simple ratio ou relação simples modificada, relacionada à linearização do índice em relação aos parâmetros biofísicos.	Chen (1996)
MPRI	$MPRI = (Vis_{550} - Vis_{670})*(Vis_{550} + Vis_{670})^{-1}$	Modified photochemical reflectance index ou índice de refletância fotoquímica modificado (MPRI)	Yang et al. (2008)

Nir_{760}, Re_{720}, Vis_{670} e Vis_{550} são as refletância das banda nos comprimetos de luz de 760, 720, 670 e 550 nm.

Esses sistemas captam dados em tempo real e com altíssima resolução, permitindo a análise detalhada de características biofísicas de plantas, solos e microambientes (Mulla, 2013; Sishodia et al., 2020).

15.2.1 Sensorimento orbital

O sensoriamento orbital tem sido utilizado na Embrapa Pecuária Sudeste para a geração de índices de vegetação e caracterização das variáveis de plantas e solo nos diferentes sistemas de cultivo. Além disso, as reflectâncias obtidas por multissensores são utilizadas em modelos de produtividade ou para caracterização das temperaturas de superfícies nos diferentes sistemas integrados.

No sistema ILP-Corte, Bernardi et al. (2017a) utilizaram imagens do satélite Landsat-5 para calcular o NDVI da lavoura de milho e da pastagem em consórcio. Com as imagens coletadas, foi possível indicar as variações da cultura do milho e pastagem. Nas regiões em que o milho cresceu adequadamente (maior fertilidade do solo), houve maior sombreamento da gramínea, e, consequentemente, menor crescimento vegetativo. Nas áreas com menor NDVI para o milho, a pastagem apresentou melhor crescimento vegetativo, indicado pelos valores mais altos de NDVI para a gramínea. Também verificaram a correspondência entre o índice de vegetação e os parâmetros do solo pH e teores de matéria orgânica, areia e argila.

Cisneros et al. (2020), a partir de modelos de estimativa de produção de forragem que correlacionaram reflectâncias de bandas espectrais com teor de nitrogênio das folhas e produção de forragem, realizaram estimativas de produtividade nos sistemas extensivos e intensivos do experimento ILPF-Corte a partir de imagens do Satélite Sentinel-2. Os autores testaram índices *Normalized Difference Vegetation Index (NDI), Three Band Index (TBI), Difference Light Height (DLH), Three Band Dall'Olmo (DO), and Normalized Area Over reflectance Curve (NAOC)*. Os autores concluíram que o uso de diferentes bandas relevantes do Sentinel-2, nas regiões do visível (Vis) e do infravermelho próximo (Nir), foram capazes de realizar estimativas do teor de nitrogênio nas folhas, produtividade da pastagem e índice de área foliar, sendo uma boa ferramenta para uso em larga escala.

Bayma et al. (2025), em um estudo na área do experimento do ILPF-Corte, nos sistemas de produção a pleno sol (Sistema Intensivo e Integração lavoura-

-pecuária), utilizaram dados de satélite multissensores embarcados nos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 (Projeto HLS da NASA) acoplada ao modelo SAFER. Os autores constataram que o modelo pode ter ampla possibilidade de uso, a partir de bases de dados de satélites e climatológicos em grandes faixas territoriais.

Além das aplicações para a estimativa da produtividade, o sensoriamento orbital também tem sido utilizado para a caracterização da temperatura de superfície, obtidas a partir de imagens Landsat 8 e 9, que compreendem os comprimentos de onda do infravermelho termal (Pezzopane et al., 2023). Os autores determinaram que as temperaturas de superfície dos sistemas silvipastoris, obtidas a partir das imagens de satélite, foram semelhantes entre si, com média de 28,9 °C no sistema ILPF-Corte e 29,4 °C no sistema SSP-Nativas e inferiores em relação a temperaturas médias da pastagem a pleno sol, que foi de 30,8 °C (Figura 15.3), mostrando o potencial de adaptação desses sistemas ao aumento de temperatura projetado pelas mudanças climáticas

15.2.2 Sensoriamento aéreo

O uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) para a obtenção de imagens de alta resolução é uma alternativa às imagens de satélite e tem despertado interesse crescente para o monitoramento de sistemas agropecuários (Tsouros et al., 2019). O diagnóstico da variabilidade espacial e temporal do componente arbóreo em sistemas integrados de produção é importante para subsidiar a tomada de decisão quanto a manejos a serem aplicados na área. Torna-se mais atrativo quando aliado a baixo custo, obtendo imagens com sensores passivos através da fotogrametria aérea digital (FAD) via ARP.

A fim de desenvolver um método de baixo custo para monitoramento do componente arbóreo, Fernandes (2025) adaptou a metodologia de Almeida et al. (2020) para o SSP-Nativas, utilizando a FAD para estimar métricas florestais como altura média (m) e diâmetro altura do peito médio (DAP - cm) ao nível de área. A partir da possibilidade de observação do solo com clareza nos sistemas integrados, possibilitando a construção do modelo digital terreno (MDT) fidedigno com a realidade topográfica, essa metodologia se mostrou capaz de obter ótimos resultados. Após realizar o voo na área de interesse com auxílio de uma ARP, os modelos tridimensionais gerados a partir de ortomosaicos e nuvem de pontos foram comparados com dados de altura média e DAP médio obtidos através de inventário florestal terrestre, através de modelos de regressão linear múltipla. Os modelos preditores contendo métricas extraídas da nuvem de pontos para estimar a altura média e DAP médio explicaram 70,4% e 50,6% da variabilidade dos dados, respectivamente. Ao final, as variáveis de interesse foram espacializadas para todo o SSP-Nativas (Figura 15.4).

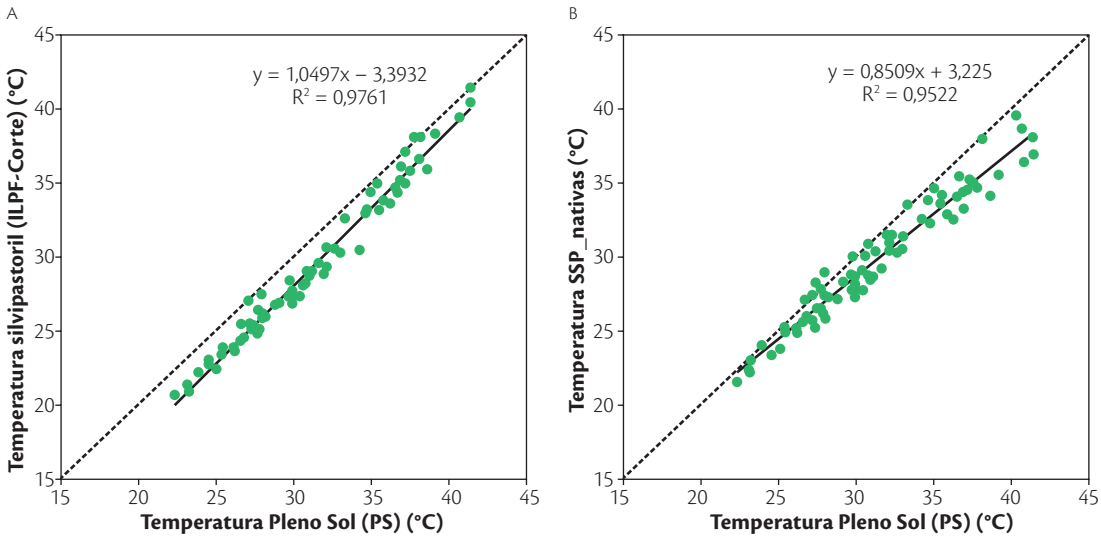


Figura 15.3. Relação entre a temperatura de superfície, obtida a partir de imagens Landsat, entre uma pastagem a pleno sol e um sistema silvipastoril arborizado com eucalipto (SSP-Corte)(A) e sistema silvipastoril arborizado com árvores nativas (SSP-Nat)(B).
Fonte: Pezzopane et al. (2023).

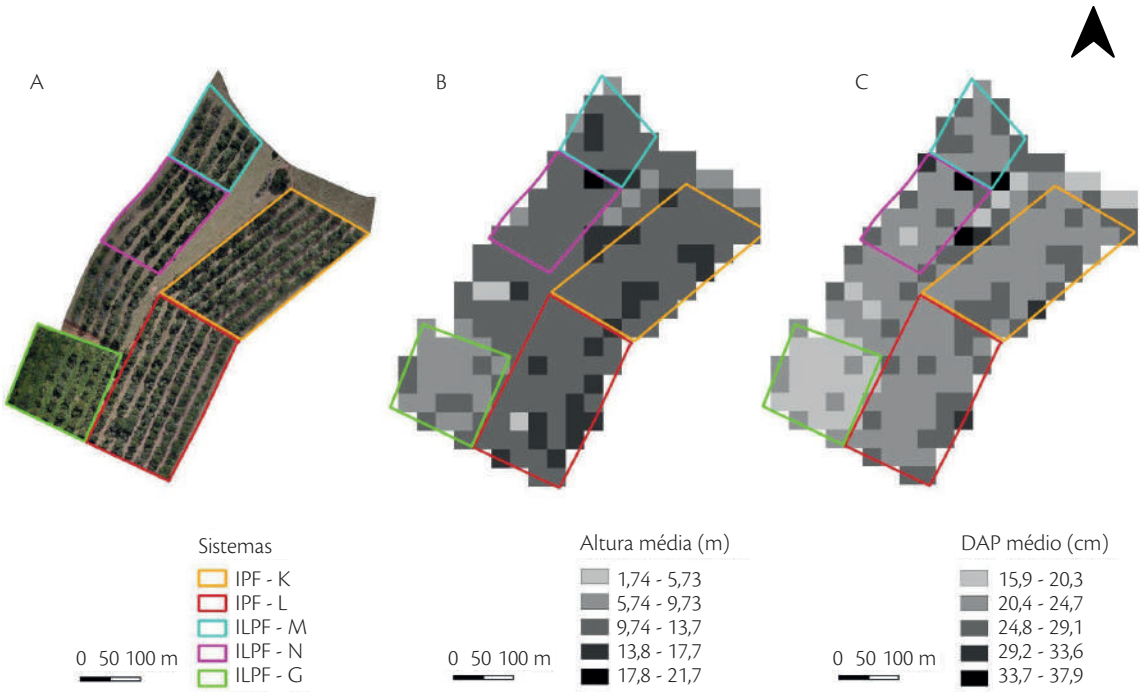


Figura 15.4. Ortomosaico do SSP-Nativas (A); Espacialização da altura média (m) dos indivíduos arbóreos (B); Espacialização do DAP médio (cm) dos indivíduos arbóreos (C).

Fonte: Fernandes (2025).

No experimento do ILPF-Corte, um estudo realizado por Bueno et al. (2024) avaliou o potencial de nuvens de pontos oriundas de imagens RGB capturadas por ARP para estimar o DAP e a altura total de árvores de (*Eucalyptus urograndis* GG100). Os resultados mostram MDT, MDS e Modelo Digital de Altura (MDA) obtidos a partir de imagens capturadas apenas na posição nadir (Figura 15.5). Ainda no mesmo estudo, a Figura 15.6 destaca as árvores que tiveram o DAP estimado a partir da nuvem de pontos geradas pelas imagens capturadas entre as linhas das plantas. A correlação obtida entre valores estimados e medidos em campo foi de 0,62 para o DAP e 0,58 para a altura das árvores, o que evidencia a viabilidade do uso de nuvens de pontos derivadas de imagens RGB para monitoramento florestal em sistemas integrados.

Na mesma área, também foi realizado um escaneamento terrestre utilizando tecnologia LiDAR com um MLS, a fim de investigar com maior precisão a estimativa do DAP e da altura das árvores. Diferentemente da fotogrametria aérea, o MLS permite uma coleta detalhada, especialmente em regiões inferiores do fuste, onde a fotogrametria aérea costuma apresentar limitações. A Figura 15.7 ilustra a nuvem de pontos obtida pelo escaneamento terrestre com MLS, destacando a precisão na definição do tronco e da copa das árvores.

Complementando essa abordagem tridimensional, uma nuvem de pontos gerada por LiDAR aerotransportado com ARP a 120 metros de altura também foi obtida em seis piquetes da área do ILPF-Corte (Figura 15.8). Essa nuvem tridimensional demonstra alta densidade e qualidade de pontos, sendo capaz de captar a estrutura das copas da vegetação, o que viabiliza a estimativa precisa de atributos como altura de árvores e estrutura de dossel. A alta resolução espacial e cobertura contínua tornam o LiDAR aerotransportado uma ferramenta importante para monitoramento florestal em larga escala.

Entre as aplicações dos dados geoespaciais oriundos de plataformas como as ARPs, destaca-se a geração de MDTs, fundamentais para representar a superfície topográfica de uma região e realizar análises hidrológicas, geotécnicas e ambientais. No intuito de avaliar a acurácia de diferentes fontes de dados para a construção de MDTs, o estudo elaborado por Bueno et al. (2022) comparou as altitudes obtidas a

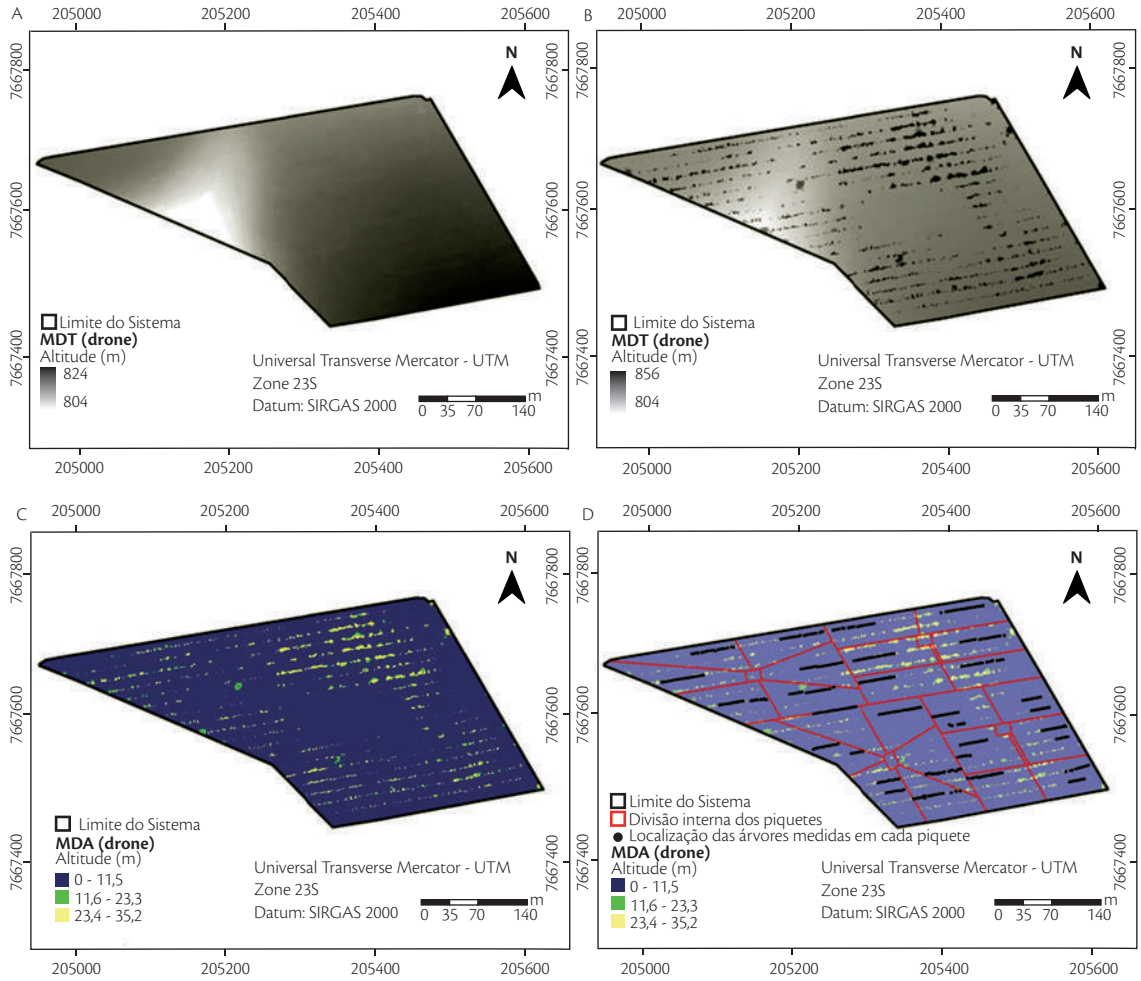


Figura 15.5. Modelo Digital de Terreno (A); Modelo Digital de Superfície (B); Modelo Digital de Altura (C); Modelo Digital de altura com transparência na imagem, divisão interna dos piquetes e localização geográfica das árvores medidas em campo no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) (D).

Fonte: Bueno et al. (2024).

partir de quatro métodos distintos: imagens capturadas por ARP, por aeronave tripulada, por satélite e medições de altitude com GPS geodésico. Apesar das diferenças numéricas entre os intervalos de altitude registrados por cada fonte, observou-se que as variações altimétricas apresentaram comportamento semelhante ao longo de toda a área analisada, evidenciando a consistência relativa entre os métodos testados e a viabilidade do uso de ARP como alternativa prática e acessível, porém com especial atenção para o uso de pontos de controle no solo (Figura 15.9).

Outra aplicabilidade de sensoriamento aéreo é feita por meio de índices de vegetação, que auxiliam no monitoramento e na estimativas de forragem em sistemas integrados, ressaltando a resposta destes mediante variações ambientais e sazonalidades. No ILPF- Corte, índices como NDVI e NDRE são calculados no software SIG a partir das bandas do espectro eletromagnético, obtidas através de sobrevoos de ARPs. Dessa forma, é possível avaliar diferentes períodos do ano, conforme ilustra a Figura 15.10. Em uma época chuvosa (março), o sistema apresenta maior produção de biomassa, enquanto em uma época seca (setembro) ocorrem menores valores dos índices, indicando menor disponibilidade de cobertura vegetal.

Além da aplicação do sensoriamento com o uso de ARPs, o sensoriamento aéreo também foi realizado com aeronaves tripuladas. No experimento do

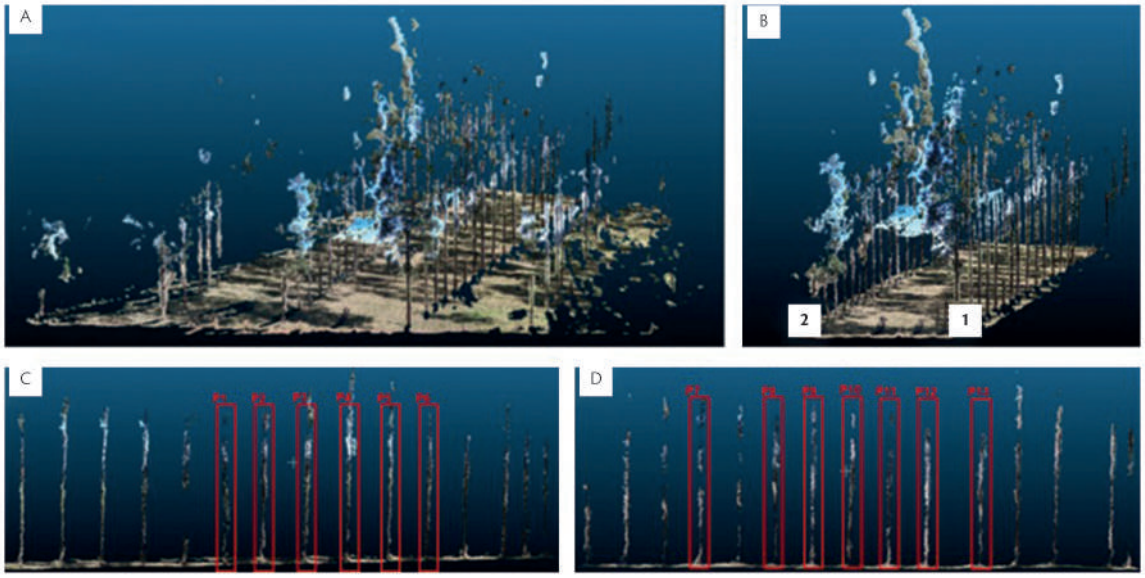


Figura 15.6. Nuvem tridimensional de pontos sem filtragem dos pontos (A); Nuvem tridimensional com filtragem dos pontos para as duas linhas de árvores (B); Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 1 (C); Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 2 (D).

Fonte: Bueno et al. (2024).

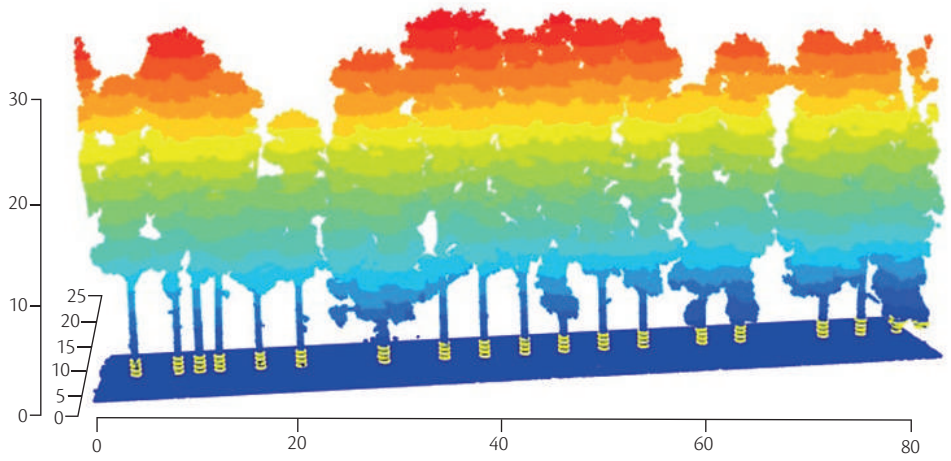


Figura 15.7. Nuvem de pontos obtida utilizando MLS em árvores do integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte).

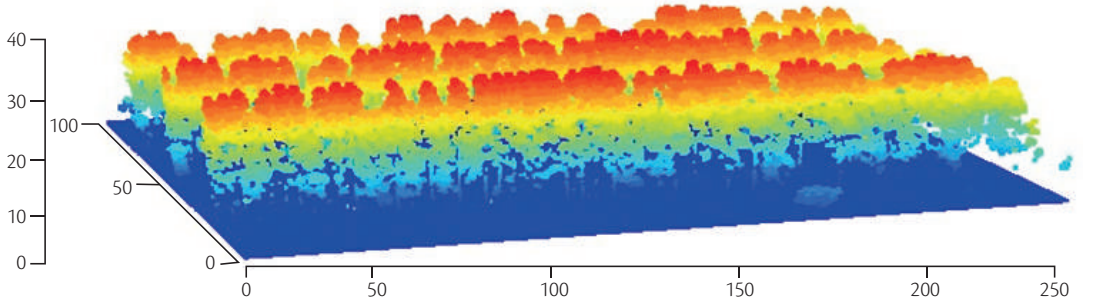


Figura 15.8. Visualização 3D da nuvem de pontos obtida por meio de LiDAR aerotransportado.

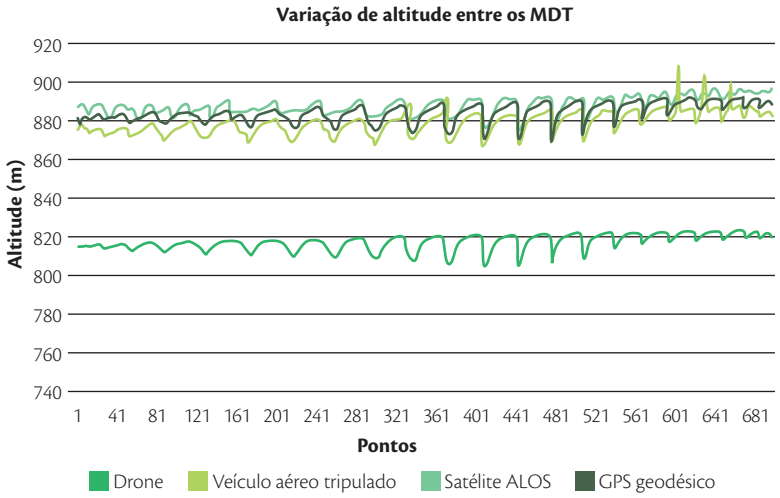


Figura 15.9. Gráfico de linhas representando as variações de altitudes dos MDT.
Fonte: Bueno et al. (2022).

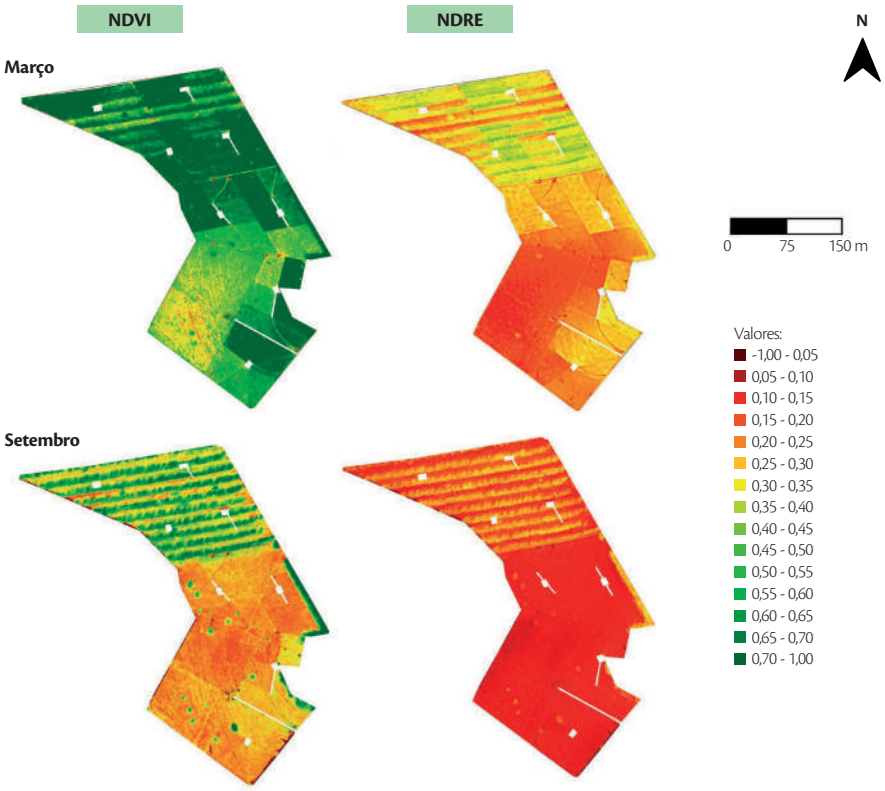


Figura 15.10. Aplicação dos Índices de vegetação NDVI e NDRE no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) em março e setembro de 2022.

ILPF-Corte, o sensoriamento remoto por termografia infravermelha a partir de imagens obtidas em câmera termográfica embarcada em avião foi utilizado por Garcia et al. (2023) para a determinação das temperaturas de superfície dos diferentes sistemas de produção (Figura 15.11). A partir de uma sequência de voos a cada 21 dias, durante um ano de execução, realizados a uma altura de 600 metros acima do nível solo, os

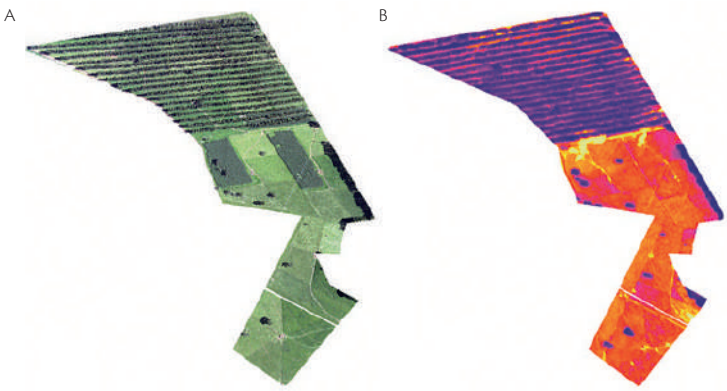


Figura 15.11. Imagem aérea no espectro visível de sistemas de produção com pastagens a pleno sol e com árvores (A) e imagem termográfica infravermelha da mesma área, mostrando diferentes zonas de temperatura da superfície da pastagem (B), no experimento integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte).

Fonte: Garcia et al. (2023).

autores concluíram que a utilização dessa metodologia permitiu a identificação precisa das diferenças termográficas entre pastagens cultivadas a pleno sol em sistemas silvipastoris, com a definição de ilhas de calor e zonas de conforto térmico animal.

15.2.3 Sensoriamento proximal

15.2.3.1 Solo

Os sensores de campo têm sido utilizados para a detecção da variabilidade do solo e para aumentar a quantidade de dados (Viscarra-Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019). Há diferentes sensores proximais para medidas de solo, que atuam de forma não destrutiva e minimamente invasiva, podendo ser eletromagnéticos, ópticos, mecânicos, acústicos e eletroquímicos (Adamchuk et al., 2004; Molin; Tavares, 2019). A maioria desses sensores fornece um sinal de saída, que pode ser influenciado por propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

As técnicas de sensoriamento proximal do solo têm sido utilizadas na avaliação da variabilidade de atributos do solo, pois são alternativas rápidas, geralmente de baixo custo e que permitem amostragens intensivas do solo. O conceito de sensoriamento proximal do solo refere-se ao uso de sensores compatíveis com operações em campo que atuam em contato ou próximas à superfície do solo (aproximadamente 2 metros) (Viscarra-Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019).

As medidas da condutividade eléctrica aparente do solo (ECa) e da resistividade elétrica (ER) com sensores proximais, combinadas com sistemas globais de navegação por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*) e sistemas de informação geográfica (GIS, *Geographical Information Systems*), têm sido uma das técnicas mais utilizadas para caracterizar os padrões espaciais das propriedades do solo (Corwin; Lesch, 2005; Samouëlian et al., 2005; Serrano et al., 2014). A ECa e ER apresentam correlações significativas com propriedades do solo como a teores de argila, matéria orgânica, concentração de sais ou umidade (Samouëlian et al., 2005; Machado et al., 2006; Bernardi et al., 2017b, 2019b; Laurenti et al., 2024).

Os sensores sem contacto ou não invasivos são baseados no princípio de indução electromagnética – EMI (Corwin; Lesch, 2005). Há sensores de contacto comerciais e em desenvolvimento que introduzem uma corrente eléctrica no solo por eletrodos em discos ou hastes para medir a ER ou ECa (Corwin; Lesch, 2005; Samouëlian et al., 2005; Rabello et al., 2014). No sistema ILP-Corte a ECa (Bernardi et al., 2017b), no ILPF-Corte a ER (Bernardi et al., 2019b; Laurenti et al., 2024) foram utilizadas para delinear zonas de manejo diferenciado nos sistemas de integração. A Figura 15.12 ilustra as diferenças na ER em três profundidades do solo no sistema ILPF-Corte.

15.2.3.2 Planta

Dentre os métodos indiretos para a estimativa de massa de forragem destacam-se os que consideram a reflectância do dossel vegetativo, que pode ser obtida com sensores proximais, os quais podem ser fixos,

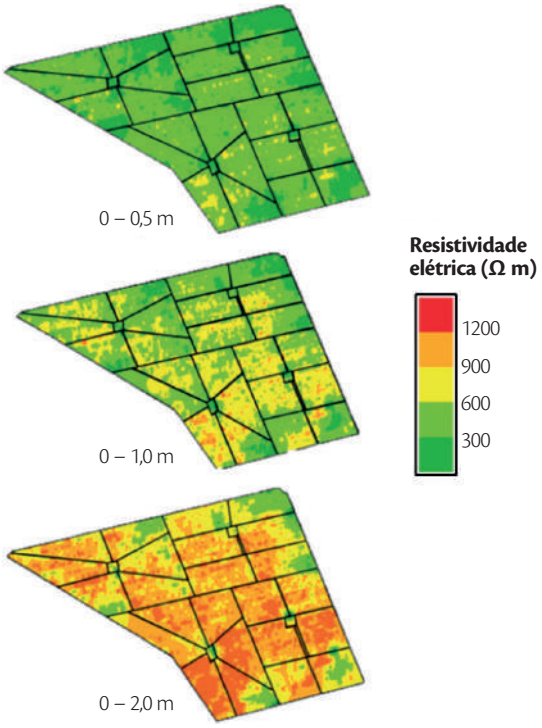


Figura 15.12. Mapa espacializado da resistividade elétrica do solo em três profundidades (0-0,5m; 0-1,0m; 0-2,0m) no sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) em São Carlos-SP.

Fonte: Adaptado de Laurenti et al. (2024).

manuais ou acoplados em tratores (Pallottino et al., 2019). Além da estimativa da massa de forragem, os sensores proximais podem estimar o valor nutritivo da forragem e auxiliar no manejo da pastagem (Pullanagari et al., 2012, Pezzopane et al., 2022).

Em um estudo realizado em pastagens de pastos de capim-piatã (*Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã) a pleno sol e pastagens de capim-piatã sombreadas por árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) pertencente ao experimento ILPF-Corte, Pezzopane et al. (2019) obtiveram equações de estimativas de massa de forragem e seus componentes a partir de índices de vegetação determinados com as reflectâncias obtidas nas bandas 670, 720 e 760 nm (Tabela 15.1) pelo equipamento ACS-430 Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, USA). Em função das diferentes estruturas de dossel entre os sistemas arborizados e a pleno sol, para a estimativa da biomassa de forragem foram obtidas equações distintas entre os sistemas. A presença de grande quantidade de material morto durante o período seco (inverno) diminuiu a capacidade preditiva da massa de forragem nessa estação, e as melhores estimativas foram para os componentes folha e caule. Segundo os autores, os IV's também foram capazes de predizer o teor de nitrogênio das pastagens nos dois sistemas de produção.

A partir da mesma série de dados utilizada por Pezzopane et al. (2019), Almeida et al. (2023) utilizaram a combinação de reflectâncias obtidas a partir do sensor proximal combinados com dados meteorológicos para a aplicação do modelos SAFER nos sistemas silvipastoril e a pleno sol, com abordagem semelhante à utilizada por Bayma et al. (2025) (ver item 2.1). As variáveis que obtiveram o melhor desempenho de estimativas do modelo foram a massa seca de folhas e colmos e a massa seca de folhas nos sistemas silvipastoril e a pleno sol, respectivamente, permitindo a obtenção de método de estimativa de forragem rápido, preciso e exato.

Em ambos os casos, os autores enfatizaram as vantagens do sistema proximal em obtenção das reflectâncias pelas pastagem em um sistema silvipastoril. Isso ocorre porque os renques de árvores possuem espaçamentos próximos uns aos outros, e nessa situação avaliações nas pastagens de pastagens com sensores proximais podem ser realizadas abaixo da copa das árvores, minimizando a influência da copa arbórea na reflectância.

O uso das reflectâncias obtidas pelos sensores proximais também podem auxiliar o manejo de pastejo nos sistemas de produção. A Figura 15.13 mostra as diferenças nos índices de clorofila (calculados conforme Tabela 15.1) obtidos com o sensor proximal ativo (Crop Circle) em um piquete do sistema ILPF-Corte, ao longo do ciclo de pastejo com bovinos. O índice de clorofila pode ser usado como indicador da saúde e vigor das plantas, e nesse exemplo da produção, pois há uma relação direta entre a biomassa e o índice de clorofila. Os valores mais altos indicam maior quantidade de biomassa da gramínea forrageira (capim-piatã). Os mapas mostram uma progressão da oferta de biomassa da pastagem ao longo da ocupação do piquete, e também da dinâmica de pastejo, fundamentais para maximizar a produção de carne, sem comprometer a longevidade da pastagem.

15.3 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento é uma área interdisciplinar que integra conhecimentos da ciência da computação,

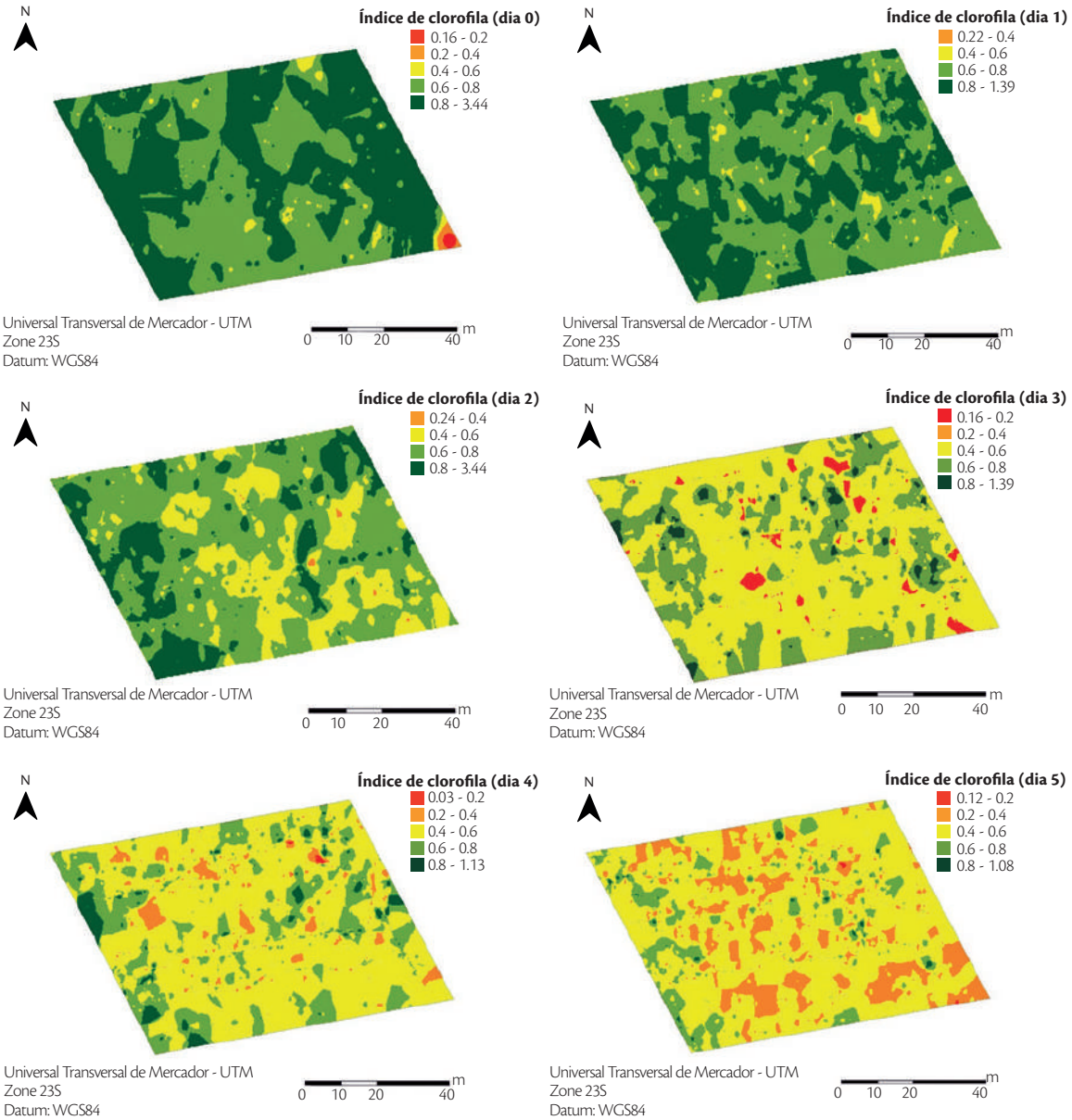


Figura 15.13. Índice de clorofila obtidos com sensor proximal ativo durante o ciclo de pastejo de bovinos no sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte), em São Carlos-SP.

geografia e cartografia para manipulação e análise de dados espaciais e georreferenciados. Seu desenvolvimento teve início com o objetivo de processar grandes volumes de dados provenientes de satélites e sensores remotos (Longley et al., 2015). Atualmente, o geoprocessamento envolve o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para coletar, processar, analisar e modelar informações espaciais, sendo amplamente utilizado em estudos ambientais, planejamento urbano, monitoramento agrícola e gestão de recursos naturais. A modelagem via SIG possibilita a sobreposição e fusão de diversas camadas de dados, ampliando a capacidade de interpretação e auxiliando na tomada de decisão (Tomlinson, 2007).

A equipe da Embrapa Pecuária Sudeste (Rocha Filho; Primavesi, 1997; Primavesi et al., 1999) já vem aplicando o SIG (IDRISI, Clark Labs, Worcester, EUA) para o cruzamento de dados dos mapas temáticos de uso e ocupação do solo, cartas planialtimétricas, hidrografia, altimetria e pedologia da área experimental (Fazenda

Canchim). Estes trabalhos pioneiros tinham como objetivo analisar as características fisiográficas, detectar as potencialidades e fragilidades, para preservação dos recursos naturais associada à redução dos impactos ambientais e a otimização dos processos produtivos.

No contexto dos SIGs, as técnicas de interpolação espacial desempenham um papel importante na estimativa de valores em locais não amostrados, com base em dados coletados em campo. Essas técnicas são especialmente úteis para variáveis contínuas, como NDVI, produtividade ou teor de carbono no solo.

A interpolação espacial pode ser classificada em dois grandes grupos: métodos determinísticos e métodos geoestatísticos. Os determinísticos, como IDW, TIN e análise de tendência, utilizam fórmulas matemáticas fixas que ponderam os valores conhecidos pela distância, sem considerar a estrutura espacial dos dados (Lu; Wong, 2008). Já os geoestatísticos, como a krigagem e suas variantes, modelam a dependência espacial por meio de semivariogramas, permitindo não apenas estimativas mais precisas, mas também a quantificação da incerteza associada às predições (Oliveira et al., 2015).

15.3.1 Geoestatística

Entre as ferramentas de geoprocessamento, a geoestatística se destaca por permitir analisar a variabilidade espacial e modelar a dependência entre pontos amostrados. Nesse contexto, a krigagem ordinária se diferencia das técnicas de interpolação determinísticas por incorporar a estrutura espacial dos dados e o conceito de dependência espacial. Por meio do semivariograma, a técnica modela a variabilidade entre pares de pontos amostrados e permite estimativas mais precisas, e não tendenciosas, para locais não amostrados. Ela também quantifica a incerteza associada às predições por meio da variância, permitindo uma avaliação confiável da qualidade das estimativas em aplicações como mapeamento de atributos contínuos (Grego et al., 2014; Oliveira et al., 2015).

Como a geoestatística permite estimar valores em locais não amostrados utilizando a informação espacial disponível, Bueno et al. (2023) desenvolveram um estudo com o objetivo de estimar as alturas das árvores do ILPF-Corte. Os autores utilizaram imagens capturadas por ARP e aplicaram técnicas de geoprocessamento e geoestatística. As imagens foram processadas para gerar MDS e MDT, e a diferença entre esses modelos resultou no MDA. As alturas extraídas do MDA apresentaram correlação moderada com as alturas medidas em campo com clinômetro (r = 0,58), enquanto a aplicação de krigagem para interpolação das áreas com falhas no MDA (Figura 15.14) resultou em uma correlação mais baixa (r = 0,38). Apesar da redução na correlação, a diferença entre as médias das alturas estimadas e medidas com clinômetro foi de apenas 1,1 metro, demonstrando que a interpolação pode ser uma alternativa viável para ampliar a estimativa em áreas com falhas na sobreposição de imagens. Este estudo destaca o potencial do uso combinado de ARP, geoprocessamento e geoestatística para mensuração de atributos dendrométricos em sistemas de produção integrados.

Outros estudos realizados nos sistemas ILP-Corte (Bernardi et al., 2017a) e ILPF-Corte (Bernardi et al., 2017b) também utilizaram a krigagem para estudar a estrutura espacial das variáveis de solo e planta, confirmando que a krigagem também fornece um mapa de variância (ou erro de estimativa), que indica a confiabilidade dos valores interpolados em cada ponto.

O uso da geoestatística é, portanto, fundamental para compreender a distribuição espacial de atributos ambientais. Por meio dela, torna-se possível identificar padrões e tendências que otimizam o manejo e contribuem para maior produtividade e sustentabilidade. Além disso, fornece ferramentas que subsidiam a tomada de decisão em diversas áreas do conhecimento, como agricultura de precisão e ciências ambientais.

15.3.2 Métodos de interpolação espacial

Para estimar valores em locais sem dados, a escolha do método de interpolação é essencial para garantir a acurácia das estimativas. Um dos mais utilizados é a Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW – *Inverse Distance Weighting*), que calcula a média ponderada dos pontos vizinhos, atribuindo menor peso àqueles mais distantes (Lu; Wong, 2008). Outros métodos incluem média simples, vizinho mais próximo, interpolação linear por triangulação, curvatura mínima (spline), polinômio local e inverso ponderado da distância também podem ser utilizados.

Pezzopane et al. (2024), a partir de registros de radiação fotossinteticamente ativa, buscaram descrever a variabilidade espacial e temporal da transmissão de Radiação Fotossinteticamente Ativa na área Silvipastoril do ILPF. Os autores acompanharam o comportamento

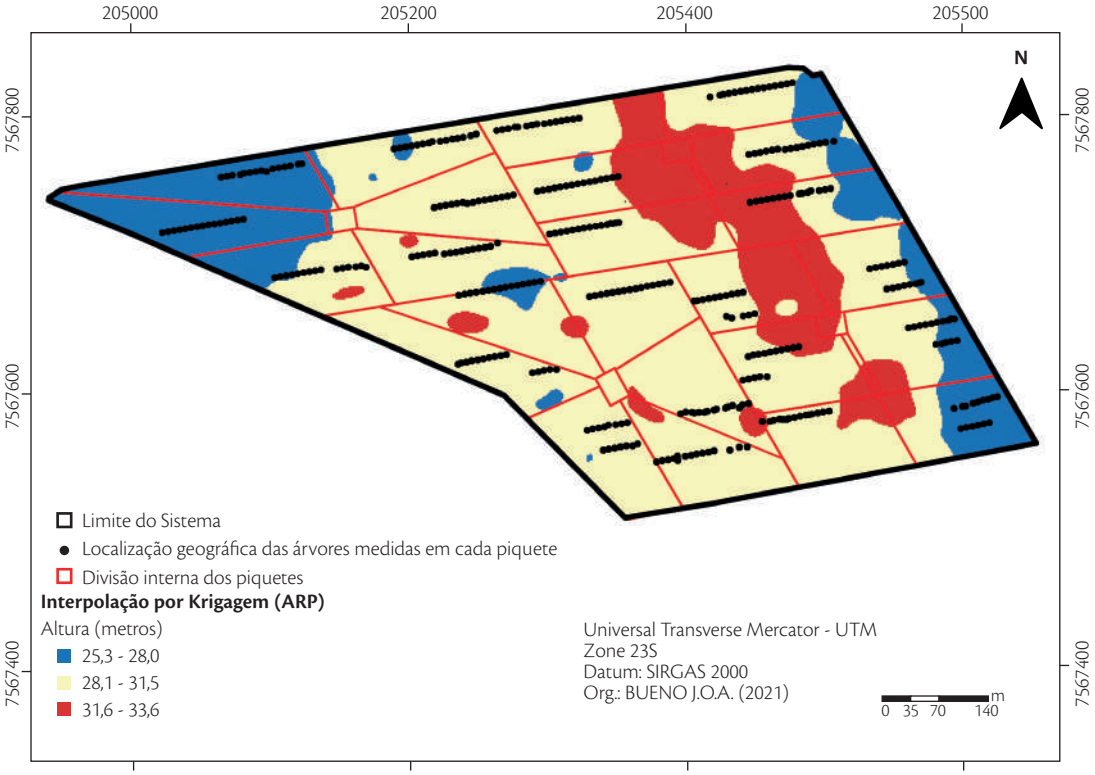


Figura 15.14. Interpolação por krigagem das árvores com medidas encontradas no MDA.
Fonte: Bueno et al. (2023).

das transmissões após três desbastes de árvores ao longo do período do estudo por meio de sensores lineares e datalogger, instalados perpendicularmente ao transecto de árvores, e utilizaram o método interpolação vizinho mais próximo. Assim, pôde-se verificar que os menores registros de transmissão ocorreram entre os períodos de primavera e verão, enquanto no outono e inverno em todo o sistema registrou menor transmissão (Figura 15.15). Assim, tal técnica possibilita descrever padrões e auxiliar na gestão de diferentes etapas de sistemas.

Garcia et al. (2023) buscaram testar a eficácia do monitoramento termal em áreas de culturas e pastagens utilizando aeronave. Sobrevoos foram conduzidos na área ILPF-Corte para criação de mapas de calor por interpolação pela técnica IDW (Figura 15.11), gerados por meio de imagens de câmeras termais e para realização de análises estatísticas. Neste estudo, houve correlação desses dados com as estações de microclima instaladas no campo e permitindo identificar padrões climáticos ao longo das estações.

Selli et al. (2024), por meio de análises espaciais, buscaram mensurar os efeitos de incêndios acidentais na área afetada do ILPF-Leite. Nesse trabalho, os autores coletaram métricas arbóreas em campo para, posteriormente, aplicação da técnica IDW (Figura 15.16), estimar o volume de madeira das árvores e as perdas monetárias geradas pelo fogo. Como resultado, foi possível espacializar os danos causados pelo incêndio, além de permitir compreender como o fogo afetou o crescimento das árvores no sistema, bem como a produção de madeira que sofreu perdas significativas.

Também utilizando o IDW, Bernardi et al. (2019a) aplicaram técnicas de análise espacial na área do ILPF-Corte para modelar a variabilidade das propriedades químicas do solo. As amostras de solo foram georreferenciadas, e os dados obtidos serviram de base para a interpolação dos mapas de recomendação de calcário e adubação fosfatada. A partir desses mapas (Figura 15.17), foi possível aplicar insumos à taxa variável considerando os piquetes de 0,5 ha como unidades mínimas de manejo (Bernardi et al., 2017b), propor-

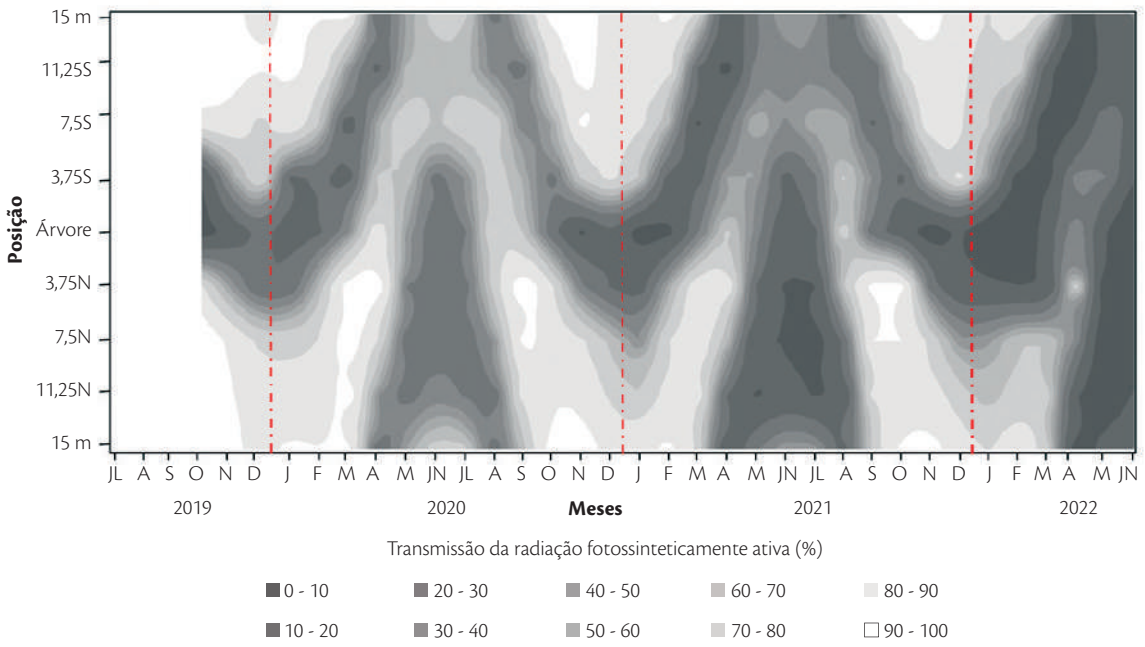


Figura 15.15. Variabilidade espaço temporal da transmissão de Radiação Fotossinteticamente Ativa em um Sistema silvipastoril, entre os anos de 2019 e 2022. Interpolação realizada pelo método do vizinho mais próximo.

Fonte: Pezzopane et al. (2024).

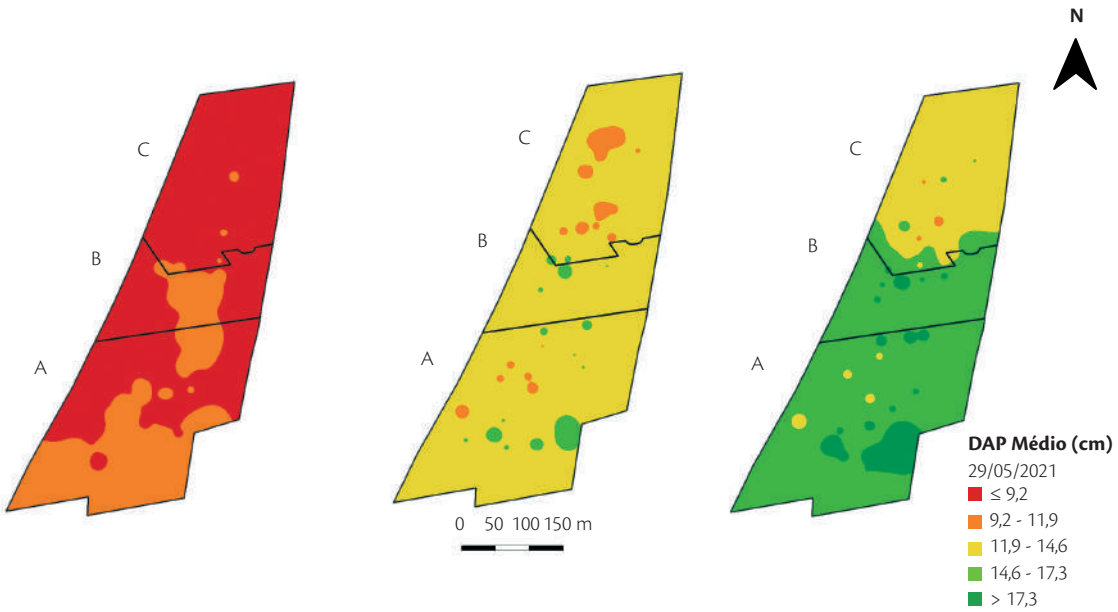


Figura 15.16. Mapa espacializado do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores de eucalipto Citrodora no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (A), integração pecuária-floresta (IPF) (B) e integração-pecuária-floresta atingido pelo incêndio (C) no experimento ILPF-Leite em São Carlos-SP.

Fonte: Selli et al (2024).

cionando uma correção mais eficiente e localizada. Ao longo das safras, os resultados demonstraram aumento na homogeneidade dos atributos químicos do solo.

A geração de mapas interpolados e o uso de tecnologias de aplicação localizada reforçam o papel dos métodos de interpolação como ferramenta de suporte

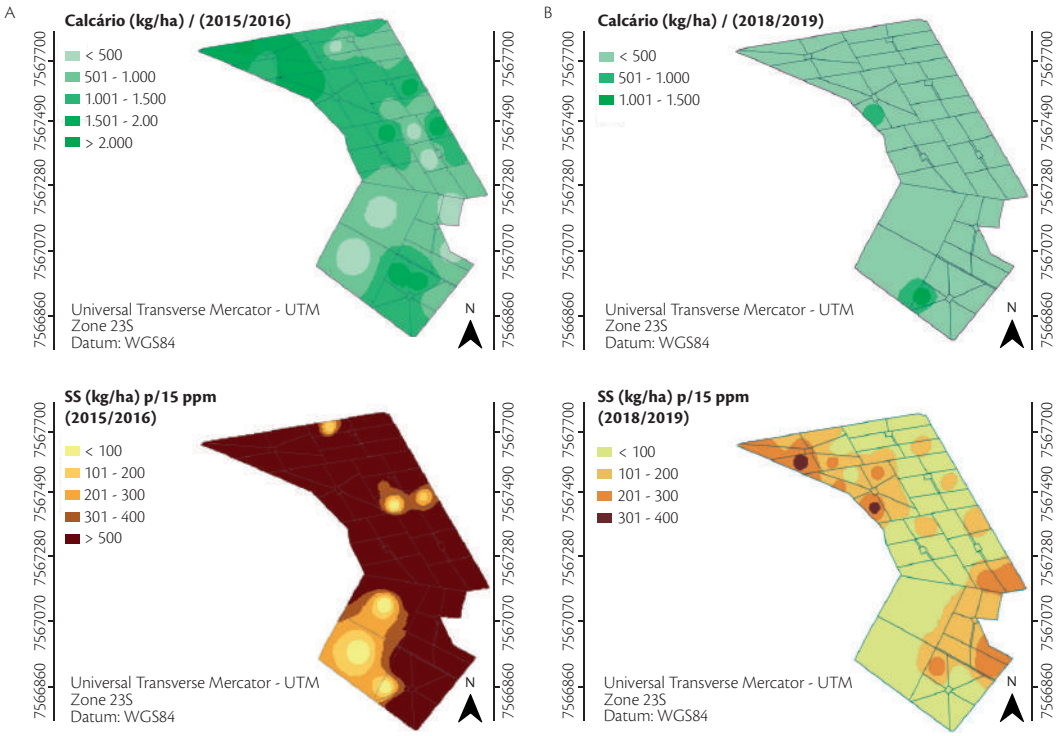


Figura 15.17. Mapas interpolados de aplicação de calcário de superfosfato simples nas safras 2015-16 (A) e 2018-19 (B) em sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) em São Carlos-SP.

Fonte: Bernardi et al. (2019).

à agricultura de precisão e ao uso sustentável dos insumos. Laurenti et al. (2024) também aplicaram o interpolador IDW para gerar mapas temáticos das propriedades químicas e físicas do solo, e do volume de madeiras das árvores do sistema ILPF-Corte. Para realizar a análise estatística descritiva, interpolação dos dados por IDW, geração de mapas temáticos das propriedades do solo e da produtividade, foi desenvolvido e registrado um software na linguagem R (Bernardi et al., 2025), que possibilitou automação dessas análises e a representação da variabilidade espacial das variáveis.

Bernardi et al. (2017b) compararam as metodologias de interpolação para a geração de mapas as propriedades do solo e de recomendação de correção do solo e adubação do sistema ILPF-Corte, e verificaram que o IDW gerou mapas com um detalhamento excessivo (padrões circulares ao redor dos pontos de amostragem, conhecidos como "efeito olho de boi"), ao contrário da krigagem. Assim, apesar da maior facilidade da interpolação por IDW, como o mapa gerado não considerava a estrutura espacial dos dados e o resultado nem sempre correspondia à realidade, poderiam levar a decisões equivocadas de manejo. Já a krigagem, que exige um conhecimento mais aprofundado para utilizar o semivariograma para modelar a estrutura de variabilidade espacial, forneceu o menor erro de estimativa, e foi considerado o método mais adequado para gerar os mapas daquelas variáveis estudadas.

15.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As geotecnologias representam um conjunto fundamental de ferramentas para a análise, monitoramento e gestão dos sistemas de ILPF. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto orbital, aéreo e proximal, além de sistemas de informações geográficas (SIG) e técnicas de geoestatística, tem proporcionado avanços expressivos na compreensão da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo, da vegetação e do microclima nesses sistemas.

Na Embrapa Pecuária Sudeste, essas tecnologias possibilitam o desenvolvimento de metodologias inovadoras para a estimativa de parâmetros produtivos e

ambientais, superando limitações dos métodos tradicionais baseados em amostragens diretas e pontuais. O uso de imagens de satélite e de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) permite a geração de informações precisas sobre produtividade vegetal, estrutura da vegetação, especialmente o componente arbóreo dos sistemas ILPF, temperatura de superfície e vigor da planta, enquanto o sensoriamento proximal amplia o detalhamento dos dados em escala local, especialmente sob a copa das árvores.

Além disso, os SIGs integrados às técnicas de interpolação espacial, como krigagem e IDW, permitem a espacialização e modelagem da variabilidade dos atributos, viabilizando a delimitação de zonas de manejo e o suporte a decisões estratégicas, como a aplicação de fertilizantes, manejo de lotação animal e avaliação do conforto térmico dos animais.

15.4 REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002.

ALMEIDA, A.; GONÇALVES, F.; SILVA, G.; SOUZA, R.; TREUHAFT, R.; SANTOS, W.; LOUREIRO, D.; FERNANDES, M. Estimating structure and biomass of a secondary Atlantic Forest in Brazil using fourier transforms of vertical profiles derived from UAV photogrammetry point clouds. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 1-25, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12213560.

ALMEIDA, S. H. L.; SOUZA, J. B. C.; NOGUEIRA, S. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; TEIXEIRA, A. H. C.; BOSI, C.; ADAMI, M.; ZERBATO, C.; BERNARDI, A. C. C.; BAYMA, G.; SILVA, R. P. Forage mass estimation in silvopastoral and full sun systems: evaluation through proximal remote sensing applied to the SAFER model. **Remote Sensing (Basel)**, v. 15, n. 3, p. 815, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/rs15030815.

ALMEIDA, D. R. A.; VEDOVATO, L. B.; FUZA, M.; MOLIN, P.; CASSOL, H.; RESENDE, A. F.; KRAINOVIC, P. M.; ALMEIDA, C. T.; AMARAL, C.; HANEDA, L.; ALBUQUERQUE, R. W.; GORGENS, E.; ROMANELLI, J.; FERREIRA, M.; SALK, C.; ESPINOZA, N.; SILVA, C.; BROADBENT, E.; BRANCALION, P. H. S. Remote sensing approaches to monitor tropical forest restoration: Current methods and future possibilities. **Journal of Applied Ecology**, v. 62, n. 2, p. 188-206, 2025. DOI: http://doi.org/10.1111/1365-2664.14830.

BAYMA, G.; NOGUEIRA, S. F.; ADAMI, M.; SANO, E. E.; NUÑEZ, D. C.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; GREGO, C. R.; DE CASTRO TEIXEIRA, A. H.; SKAKUN, S. Estimating forage mass in Brazilian pasture-based livestock production systems through satellite and climate data integration. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 237, p. 1-15, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110496.

BERNARDI, A. C. C.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of vegetation index and soil properties in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 513-518, 2017a. DOI: http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p513-518.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 590-593, 2017b. DOI: http://doi.org/10.1017/S2040470017001145.

BERNARDI, A. C. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ALVES, T. C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, R. M.. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 13, n. 4, p. 290-300, 2019a. DOI: http://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n4p290-300.

BERNARDI, A. C. C.; PITRAT, T.; RABELLO, L. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G. G.; BETTIO, G. M. Differences in soil electrical resistivity tomography due to soil water contents in an integrated agricultural system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. 1-5, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00774.

BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; GUIMARÃES, E. S.; RODRIGUES, J.; PEZZOPANE, J. R. M.; LAURENTI, N. Programa de análise espacial e interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighting* - IDW). In: INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (ed.). **Revista da Propriedade Industrial**. Brasília: INPI, 2025. p. 31. (Programas de computador Seção VII, 2824). Disponível em: https://revistas.inpi.gov.br/pdf/Programa_de_computador2824.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

BUENO, J. O. A.; CRESTANA, S.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOURSCHEIDT, V.; BERNARDI, A. C. C. Comparação entre modelos digitais de terreno gerados por quatro fontes de dados diferentes. **Concilium**, v. 22, n. 1 p. 1-14, 2022. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1148955. Acesso em: 10 out. 2025.

BUENO, J. O. A.; CRESTANA, S.; GUIMARAES, E. S.; PEZZOPANE, J. R.; BOURSCHIEDT, V.; BERNARDI, A. Geoestatística como ferramenta auxiliar para estimar altura de eucaliptos tendo como base modelo digital de altura gerado por meio de imagens obtidas por drone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/geoestatistica-como-ferramenta-auxiliar-para-estimar-altura-de-eucaliptos-tendo?lang=pt-br. Acesso em: 10 out. 2025.

BUENO, J. O. A.; CRESTANA, S.; GUIMARAES, E. S.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOURSCHEIDT, V.; BERNARDI, A. C. C.. Imagens obtidas por drone para estimativas de diâmetro e altura de árvores em sistema integrado de produção agropecuária. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**:

um novo olhar na era digital. São Carlos: Editora Cubo, 2024. p. 773-781. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000051.

CHEN, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 229-242, 1996. DOI: https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178.

CISNEROS, A.; FIORIO, P.; MENEZES, P.; PASQUALOTTO, N.; VAN WITTENBERGHE, S.; BAYMA, G.; FURLAN NOGUEIRA, S. Mapping Productivity and Essential Biophysical Parameters of Cultivated Tropical Grasslands from Sentinel-2 Imagery. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 1-23, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy10050711.

CORWIN, D.; LESCH, S. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005.

FERNANDES, P. H. G. **Análise multidimensional dos componentes edáfico e arbóreo em sistemas integrados de produção**. 2025. 193 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.14289/22530. Acesso em: 10 out. 2025.

GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R.; REDAELLI, V.; LUZI, F.; LAURENTI, N.; MENEGAZZO, L. P.; GRUDZINSKI, C. E.; SANTOS JUNIOR, P. C.; BARBOSA, A. V. C. Use of infrared thermography from a crewed aerial vehicle for remote sensing of tropical pasture areas with different levels of afforestation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 213, p. 1-11, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108198.

GITELSON, A. A.; GRITZ, U.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003. DOI: http://doi.org/10.1078/0176-1617-00887.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1004020. Acesso em: 10 out. 2025.

HOUBORG, R.; MCCABE, M. F. High-resolution NDVI from Planet's constellation of earth observing nanosatellites: a new data source for precision agriculture. **Remote Sensing (Basel)**, v. 8, n. 9, p. 1-19, 2016. DOI: http://doi.org/10.3390/rs8090768.

HYYPPA, E.; YU, X.; KAARTINEN, H.; HAKALA, T.; KUKKO, A.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, J. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. **Remote Sensing**, v. 12, n. 20, p. 1-31, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12203327.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment**: an earth resource perspective. 2. ed. New Delhi: Pearson Education, 2009.

KARNIELI, A.; AGAM, N.; PINKER, R. T.; ANDERSON, M.; IMHOFF, M. L.; GUTMAN, G. G.; PANOV, N.; GOLDBERG, A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. **Journal of Climate**, v. 23, n. 3, p. 618-633, 2010. DOI: http://doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1.

KUZELKA, K.; SLAVIK, M.; SUROVY, P. Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p. 1-20, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12081236.

LAURENTI, N.; PEZZOPANE, J. R. M.; GUIMARÃES, E. S.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, J. Spatial variability of soil and vegetation properties in integrated production systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 10, p. 3-9, 2024. DOI: http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n10e280481.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic information science and systems**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 9, p. 1044-1055, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.010.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023-1031, 2006. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000600019.

MOLIN, J. P.; TAVARES, T. R. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: Challenges, advances and perspectives in Brazilian tropical soils. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. spe, p. 126-147, 2019. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep126-147/2019.

MULLA, D. J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDAO, Z. N. (ed). **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 159 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1039734. Acesso em: 10 out. 2025.

PALLOTTINO, F.; ANTONUCCI, F.; COSTA, C.; BISAGLIA, C.; FIGORILLI, S.; MENESATTI, P. Optoelectronic proximal sensing vehicle-mounted technologies in precision agriculture: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 859-873, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.034.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; CRIPPA, P. H.; SANTOS, P. M.; NARDACHIONE, E. C. Assessment of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 130-139, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; SENGLING, O.; BONANI, W. L.; BRUNETTI, H. B.; SANTOS, P. M. Estimating productivity and nutritive value of Marandu palisadegrass using a proximal canopy reflectance sensor. **Experimental Agriculture**, v. 58, p. e28, 2022. DOI: http://doi.org/10.1017/S0014479722000242.

PEZZOPANE, J. R. M.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, S. L.; MAIELLO, I. P.; BERNARDI, A. C. C.; SANTOS, S. A.; GARCIA, A. R. Modelo agrometeorológico para estimar a temperatura de superfície em sistemas silvipastoris. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE SISTEMAS SILVOPASTORILES, 12., 2023, Montevideo. **Sistemas silvopastoriles: hacia una diversificación sostenible**. Cali: CIPAV, 2023. v. 1. p. 664-668.

PEZZOPANE, J. R.M.; MAIELLO, I. P.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C. Variabilidade espaçotemporal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa em sistema silvipastoril. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2024. p. 758-761. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000047.

PINTER JUNIOR, P. J. J.; HATFIELD, J. L.; SCHEPERS, J. S.; BARNES, E. M.; MORAN, M. S.; DAUGHTRY, C. S. T.; UPCHURCH, D. R. Remote sensing for crop management. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 6, p. 647-664, 2003. DOI: http://doi.org/10.14358/PERS.69.6.647.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. P. A.; PEDROSO, A. F.; CAMARGO, A. C.; RASSINI, J. B.; ROCHA FILHO, J.; OLIVEIRA, G. P.; CORREA, L. A.; ARMELIN, M. J. A.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. **Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim**: um modelo real de laboratório ambiental. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 1999. 133 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa, 5). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/45114?locale=es. Acesso em: 10 out. 2025.

PRIMICERIO, J.; DI GENNARO, S. F.; FIORILLO, E.; GENESIO, L.; LUGATO, E.; MATESE, A.; VACCARI, F. P. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 517-523, 2012. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6.

PULLANAGARI, R. R.; YULE, I. J.; TUOHY, M. P.; HEDLEY, M. J.; DYNES, R. A.; KING, W. M. Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectral radiometry. **Grass and Forage Science**, v. 68, n. 1, p. 110-119, 2012. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00877.x.

RABELLO, L. M.; BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Mapeamento da condutividade elétrica do solo - sistema protótipo. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 48-57. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1003471. Acesso em: 10 out. 2025.

ROCHA FILHO, J.; PRIMAVESI, O. Utilização do SIG – IDRISI para caracterização da microbacia do Ribeirão Canchim (Fazenda Canchim - Embrapa, São Carlos, SP): 2- cobertura vegetal arbórea. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO – GIS BRASIL, 3., 1997, Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba: SAGRES, 1997.

RODRIGUEZ, D.; FITZGERALD, G. J.; BELFORD, R.; CHRISTENSEN, L. K. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 7, p. 781-789, 2006. DOI: http://doi.org/10.1071/AR05361.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005. DOI: http://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0009.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 1974. 371 p. (Type III Final Report).

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173-193, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004.

SCHNEIDER, F. D.; KÜKENBRINK, D.; SCHAEPMAN, M. E.; SCHIMEL, D. S.; MORSDORF, F. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-range LiDAR. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 249-257, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.033.

SELLI, L.; PEZZOPANE, J. R. M.; ALVES, T. C.; BERNARDI, A. C. C. Variabilidade espacial do crescimento do eucalipto em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta parcialmente atingido por incêndio. In: BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; PIRES, J. L. F.; GEBLER, L.; JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar na era digital. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2024, p. 789-796. DOI: http://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000050.

SERRANO, J.; PEÇA, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S. Avaliação de tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes: novos conceitos de gestão em pastagens permanentes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 37, n. 3, p. 253-269, 2014. **DOI: http://doi.org/10.19084/rca.16822**.

SISHODIA, R. P.; RAY, R. L.; SINGH, S. K. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 19, p. 1-31, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12193136.

SOMMER, S.; HILL, J.; MEGIER, J. The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes and their effects on soil conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 67, n. 2-3, p. 197-209, 1998. DOI: http://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00119-9.

TEILLET, P. M.; STAENZ, K.; WILLIAM, D. J. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 139-149, 1997. DOI: http://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00248-9.

TOMLINSON, R. **Thinking about GIS**: geographic information system planning for managers. 3. ed. Redlands, CA: ESRI Press, 2007.

TSOUROS, D. C.; BIBI, S.; SARIGIANNIDIS, P. G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. **Information**, v. 10, n. 11, p. 1-26, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/info10110349.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: http://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; BOUMA, J. Soil sensing: a new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems**, v. 148, p. 71-74, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001.

WANG, R.; BAO, T.; TIAN, S.; SONG, L.; ZHONG, S.; LIU, J.; YU, K.; WANG, F. Quantifying understory vegetation cover of *Pinus massoniana* forest in hilly region of south China by combined near-ground active and passive remote sensing. **Drones**, v. 6, n. 9, p. 1-16, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/drones6090240.

WANG, X.; ZENG, H.; YANG, X.; SHU, J.; WU, Q.; QUE, Y.; YANG, X.; YI, X.; KHALIL, I.; ZOMAYA, A. Y. Remote sensing revolutionizing agriculture: Toward a new frontier. **Future Generation Computer Systems**, v. 166, p. 1-17, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.future.2024.107691.

WU, Z.; DYE, D.; VOGEL, J.; MIDDLETON, B. Estimating forest and woodland aboveground biomass using active and passive remote sensing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 82, n. 4, p. 271-281, 2016. DOI: http://doi.org/10.14358/PERS.82.4.271.

WULDER, M. A.; ROY, D. P.; RADELOFF, V. C.; LOVELAND, T. R.; ANDERSON, M. C.; JOHNSON, D. M.; HEALEY, S.; ZHU, Z.; SCAMBOS, T. A.; PAHLEVAN, N.; HANSEN, M.; GORELICK, N.; CRAWFORD, C. J.; MASEK, J. G.; HERMOSILLA, T.; WHITE, J. C.; BELWARD, A. S.; SCHAAF, C.; WOODCOCK, C. E.; HUNTINGTON, J. L.; LYMBURNER, L.; HOSTERT, P.; GAO, F.; LYAPUSTIN, A.; PEKEL, J. -F.; STROBL, P.; COOK, B. D. Fifty years of Landsat science and impacts. **Remote Sensing of Environment**, v. 280, p. 1-21, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**, v. 2017, n. 1, p. 1-17, 2017. DOI: http://doi.org/10.1155/2017/1353691.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image on crop classification accuracy. In: PECORA – The future of land imaging... going operational, 17., 2008, Denver, Colorado. **Proceedings...** Maryland: ASPRS, 2008.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693-712, 2012. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5.

Capítulo 16

Modelagem do Crescimento e Desenvolvimento de Plantas[1]

Cristiam Bosi, José Ricardo Macedo Pezzopane, Patricia Menezes Santos, Henrique Bauab Brunetti, Lucas Fillietaz Balcão



RESUMO: A modelagem do crescimento e desenvolvimento de plantas em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é mais complexa do que em monoculturas. Isso é consequência das interações dinâmicas entre árvores, culturas agrícolas, pastagens e animais nesses sistemas. Devido a essa complexidade e à escassez de trabalhos nesse tema, diversos estudos têm sido realizados na Embrapa Pecuária Sudeste com o objetivo de adaptar e desenvolver modelos para simular sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. Inicialmente foi realizado um estudo utilizando um modelo simples para estimar o crescimento de *Urochloa decumbens* em um sistema silvipastoril com árvores nativas. Posteriormente, foram realizados estudos com modelos de processos para estimar o crescimento e o desenvolvimento de *Urochloa brizantha* em um sistema silvipastoril com eucalipto. Esses estudos foram divididos em três fases, que marcaram a evolução na metodologia de modelagem para este sistema. A primeira fase simulou apenas o efeito da competição por radiação solar sobre a pastagem, a segunda fase simulou apenas o efeito da competição por água e nutrientes e a terceira fase considerou todos os tipos de competição citados, em conjunto. Mais recentemente, foi realizado um estudo com a simulação de um sistema de integração lavoura-pecuária com milho e braquiária consorciados. Todos esses estudos apresentaram resultados significativos para o desenvolvimento da modelagem de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. Porém, ainda são necessários avanços para simular esses sistemas como um todo.

Palavras-chave: Modelos de Culturas; Simulação de Crescimento Vegetal; Competição Entre Espécies; Sistema Silvipastoril; *Urochloa brizantha*, *Urochloa decumbens*.

[1] Os autores homenageiam a contribuição acadêmica e intelectual do Professor Paulo Cesar Sentelhas (*in memoriam*), da ESALQ-USP, nos estudos que geraram este capítulo.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-16

ABSTRACT: Modeling plant growth and development in integrated crop-livestock-forestry systems is more complex than in monocultures. This results from the dynamic interactions among trees, crops, pastures, and livestock within these systems. Due to this complexity and the scarcity of research on the topic, several studies have been conducted at Embrapa Pecuária Sudeste to develop and adapt models to simulate integrated crop-livestock-forestry systems. Initially, a study was carried out using a simple model to estimate the growth of *Urochloa decumbens* in a silvopastoral system with native trees. Subsequently, studies were conducted with process-based models to estimate the growth and development of *Urochloa brizantha* in a silvopastoral system with eucalyptus. These studies were divided into three phases, which marked the evolution of the modeling methodology for this system. The first phase simulated only the effect of competition for solar radiation on pasture; the second phase simulated only the effect of competition for water and nutrients; and the third phase considered all types of competition together. More recently, a simulation study of an integrated crop-livestock system with corn and palisade grass intercropped was carried out. All these studies presented significant results for the development of modeling for integrated crop-livestock-forestry systems. However, further advances are still needed to simulate these systems as a whole.

Keywords: Crop Models; Plant Growth Simulation; Species Competition; Silvopastoral System; *Urochloa brizantha*, *Urochloa decumbens*.

16.1 INTRODUÇÃO

Em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), muitas interações ocorrem entre plantas com diferentes alturas, formas e distribuições radiculares (árvores, arbustos, pastagens, culturas), e entre plantas e animais, com intensidade variando espacial e temporalmente (Porfírio-da-Silva, 2012). Gillespie et al. (2000) indicaram que a intensidade dessas interações é determinada pelos padrões de competição por recursos, principalmente por água, radiação solar e nutrientes. Diante disso, a modelagem do crescimento e desenvolvimento de culturas em sistemas de ILPF é muito mais complexa do que para culturas isoladas (Huth et al., 2002). Apesar disso, diversos esforços têm sido feitos para modelar o crescimento e o desenvolvimento de plantas em ILPF (Mobbs et al., 1997; Van Noordwijk; Lusiana, 1999; Bergez et al., 1999; Huth et al., 2002; Van Der Werf et al., 2007; Dupraz et al., 2019).

Burgess et al. (2019) citaram os principais modelos utilizados para ILPF, entre eles o modelo silvipastoril ALWAYS (*Alternative Land-use With AgroforestrY Systems*) (Bergez et al., 1999), o APSIM (*Agricultural Production Systems sIMulator*) (Holzworth et al., 2014), o Hi-sAFe (Dupraz et al., 2019), o HyPAR (Mobbs et al., 1997), o WaNuLCAS (*Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry systems*) (Van Noordwijk; Lusiana, 1999) e o Yield-SAFE (*Silvoarable Agroforestry For Europe*) (Van Der Werf et al., 2007). As abordagens mais avançadas para modelagem de ILPF, que ainda estão em desenvolvimento contínuo, são as dos modelos WaNuLCAS, APSIM, Yield-SAFE e Hi-sAFe.

Na Embrapa Pecuária Sudeste foram desenvolvidos, nos últimos anos, diversos estudos de modelagem de sistemas de ILPF, especificamente para as modalidades sistemas silvipastoris e de integração lavoura-pecuária. Essas contribuições possuem um caráter inovador importante, tendo em vista a escassez de trabalhos com esse tipo de sistemas. Esses estudos são apresentados no decorrer deste capítulo, bem como a contribuição que cada um gerou para a modelagem de sistemas de ILPF.

16.2 MODELAGEM DOS SISTEMAS INTEGRADOS

16.2.1 Estimativa da produtividade de capim-braquiária em sistema silvipastoril com árvores nativas (SSP-Nativas)

O primeiro estudo realizado com modelagem de sistemas de ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste foi executado por Bosi (2014). Este utilizou o modelo da Zona Agroecológica da FAO (FAO-MZA) (Doorenbos; Kassam, 1979) para estimar o crescimento e a produtividade de capim-braquiária (*Urochloa decumbens* (Stapf) R.D. Webster cv. Basilisk) em um sistema silvipastoril com árvores nativas do bioma Mata Atlântica (SSP-Nativas – para mais detalhes, *ver* Capítulo 3), considerando apenas os efeitos do sombreamento das árvores sobre a pastagem. Na área experimental foram mantidos bovinos da raça Canchim, em pastejo sob lotação rotativa, com período de ocupação de sete dias e período de descanso de 35 dias. A taxa de lotação

dos piquetes foi variável, sendo ajustada conforme a oferta de forragem, buscando uma altura de resíduo próxima a 0,20 m para a saída dos animais.

No período entre novembro de 2012 e setembro de 2013, foram avaliados sete ciclos de crescimento da pastagem, em quatro distâncias de avaliação: a 2 m do renque leste, a 6 m do renque leste, a 6 m do renque oeste e a 2 m do renque oeste (Figura 16.1). Nas mesmas distâncias citadas, foram instaladas estações meteorológicas para medir a radiação solar global incidente e a temperatura do ar. O processo de monitoramento de biomassa vegetal, em cada ciclo, foi dividido em cinco etapas, sendo a primeira imediatamente após a saída dos animais da área, caracterizando a vegetação em pós-pastejo, a segunda duas semanas após a saída dos animais e a terceira, quarta e quinta, três, quatro e cinco semanas após a saída dos animais. A última etapa caracterizou a coleta pré-pastejo.

O modelo utilizado nesse estudo (FAO-MZA) é empregado para a estimativa da produtividade potencial de uma cultura, ou seja, aquela obtida por uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente de crescimento, sem limitações hídricas ou por nutrientes, ou ocorrência de pragas, doenças ou plantas invasoras. Além disso, é possível calcular a produtividade atingível (PA), penalizando a produtividade potencial (PP) quando a evapotranspiração real da cultura (ETr) for menor que a evapotranspiração máxima da cultura (ETc), ou seja, quando ocorrer déficit hídrico (Doorenbos; Kassam, 1979).

O passo inicial, para a parametrização do FAO-MZA para estimar o crescimento de *U. decumbens* em sistema silvipastoril, foi utilizar um modelo já calibrado por Bosi (2014) para *U. brizantha* cv. Marandu cultivada a pleno sol, e modificar a equação de cálculo do índice de área foliar (IAF) desse modelo para estimar com mais efetividade o crescimento da *U. decumbens*.

Em seguida, a produtividade potencial (PP) foi calculada pela seguinte equação, descrita por Doorenbos e Kassam (1979):

$$PP = \sum_{i=1}^{n} \left(PPB_i * C_{IAFi} * C_{Ri} * C_{ci} \right) \quad (16.1)$$

em que: PPB corresponde à produtividade potencial bruta de uma cultura padrão (kg MS ha^{-1} dia^{-1}),

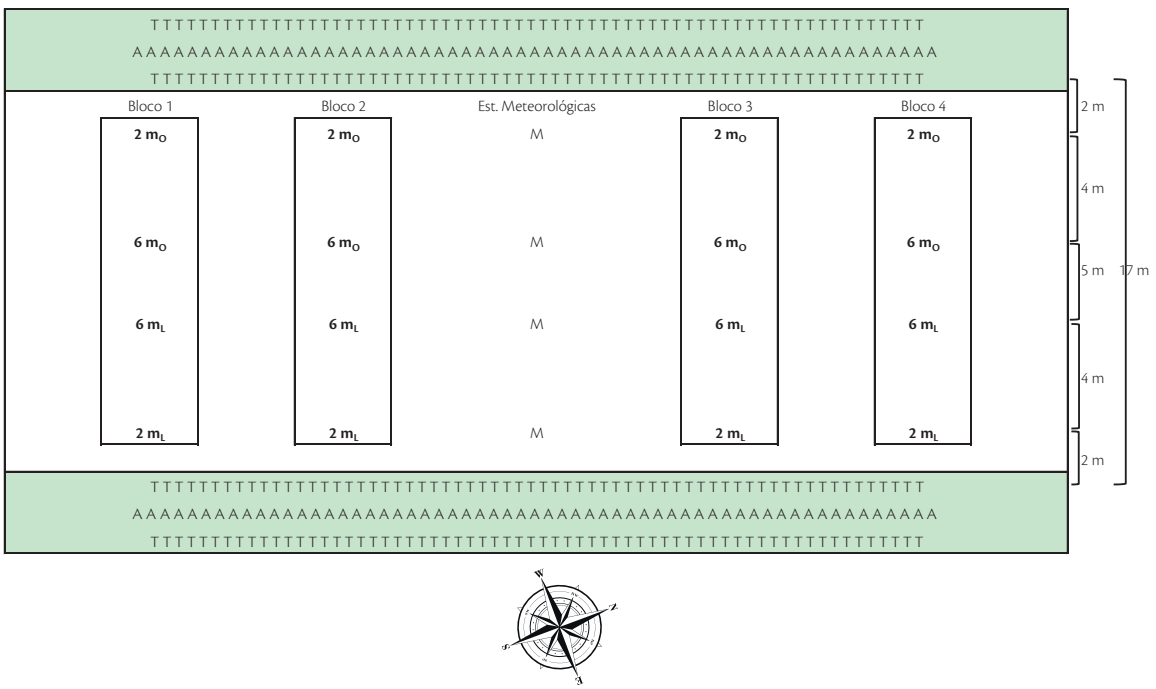


Figura 16.1. Croqui da área experimental do experimento SSP-Nativas, que representa os blocos com os pontos de coleta de dados referentes à forragem 2 m e 6 m do renque leste e 2 m e 6 m do renque oeste e ao microclima (M), além da distribuição das árvores tutoras (T) e das árvores de interesse econômico (A).
Fonte: Bosi (2014).

calculada em função da disponibilidade de radiação solar, fotoperíodo e temperatura; C_R é a correção da taxa de respiração de manutenção da cultura; C_{IAF} é o índice de correção da área foliar, sendo necessário devido à variação da área foliar disponível para realizar fotossíntese ao longo do ciclo; C_C é o índice de colheita, que efetua a correção para o produto de interesse da cultura, que no caso de plantas forrageiras é a parte aérea disponível para o pastejo (valor de 0,6 nesse estudo); i é o dia do ciclo e n a duração do ciclo.

Posteriormente, foi calculada a produtividade atingível (PA), dada pela seguinte equação:

$$PA = \sum_{i=1} \left\{ PP_i * \left[1 - ky * \left(1 - \frac{ETr_i}{ETc_i} \right) \right] * CC_{corr\,i} \right\} \quad (16.2)$$

em que: ky é o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico; ETr a evapotranspiração real da cultura (mm dia^{-1}); ETc a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia^{-1}); Cc_{corr} é a correção para o índice de colheita, dependente da deficiência hídrica (0,7 para valores de ETr/ETc < 0,5 e 1,0 para valores de ETr/ETc ≥ 0,5), pois em condições de déficit hídrico intenso ocorrem maiores perdas por senescência e alocação de fotoassimilados para o aumento do sistema radicular em busca de água; i é o dia do ciclo; n é a duração do ciclo. A ETc foi calculada utilizando-se o coeficiente da cultura (Kc) e a evapotranspiração de referência (ETo), estimada pela equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), utilizando-se dados coletados no posto meteorológico localizado a aproximadamente 500 m do experimento. A ETr foi estimada por meio do balanço hídrico sequencial da cultura (Thornthwaite; Mather, 1955), calculado com dados coletados externamente ao sistema, portanto não considerando a competição por água entre as árvores e a pastagem. O Ky foi determinado por meio do processo de calibração, já que não havia valores na literatura para espécies de braquiária (Bosi, 2014). Finalmente, os dados de PA estimados foram comparados com os observados para testar o desempenho do modelo.

As estimativas para a distância de 6 m do renque leste, que obteve o menor sombreamento (em torno de 25% em todos os ciclos), alcançaram precisão e exatidão muito boas, com R^2 de 0,89, Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,88 e erro médio (EM) baixo (-44,14 kg ha^{-1}). Para a posição a 6 m do renque oeste (com em torno de 30% de sombreamento até o ciclo 4, e chegando a 40% nas épocas seguintes), as estimativas apresentaram precisão e exatidão muito boas (R^2 = 0,90 e NSE = 0,86) e erro baixo (EM = -74,69 kg ha^{-1}) (Figura 16.2).

Já nas posições mais próximas às árvores, observou-se maior dispersão dos dados (Figura 16.2), o que indica maior complexidade dos fatores que afetam a produtividade da pastagem sob as árvores. Na posição a 2 m do renque oeste (com sombreamento chegando a 50% até o ciclo 3 e até 65% nos demais), a análise comparativa entre os dados estimados e observados demonstrou precisão muito boa (R^2 = 0,83), exatidão boa (NSE = 0,69) e erro regular (EM = -107,05 kg ha^{-1}). A posição a 2 m do renque leste (com 65% a 70% de sombreamento até o ciclo 4 e 35% a 55% nos ciclos seguintes) foi a que teve os piores resultados. Apesar disso, suas estimativas apresentaram precisão boa (R^2 = 0,79), exatidão satisfatória (NSE = 0,54) e erro regular (EM = -123,51 kg ha^{-1}).

Esses resultados demonstram que o modelo foi eficiente em estimar a produtividade atingível de *U. decumbens* em sistema silvipastoril, para as posições a 6 m dos renques, as quais possuíam maior incidência de radiação solar. Entretanto, nas posições a 2 m dos renques, o modelo gerou estimativas piores, provavelmente por não considerar nos cálculos o efeito da plasticidade fenotípica dessa espécie sob condições adversas, o que auxilia as plantas a manterem a produtividade sob sombreamento. Isso indica que novas calibrações do modelo devem ser feitas para condições específicas de alto sombreamento, o que só pode ser realizado com o conhecimento aprofundado das mudanças que ocorrem nas plantas quando há baixa radiação disponível, evidenciando a importância da realização de estudos com esse enfoque (Bosi, 2014).

16.2.2 Estimativa do crescimento e da produtividade de capim-piatã em sistema silvipastoril com eucalipto (ILPF-Corte)

A partir de 2014, foram iniciados os estudos de modelagem em sistemas de ILPF com eucalipto na Embrapa Pecuária Sudeste, mais especificamente em sistema silvipastoril com eucalipto e capim-piatã (sistema IPF do experimento ILPF-Corte, *ver* Capítulo 3). Estes estudos foram desenvolvidos em várias etapas (Bosi et al., 2020a, 2022; Balcão et al., 2024), que marcaram fases de evolução na metodologia de modelagem para este sistema. Essas fases

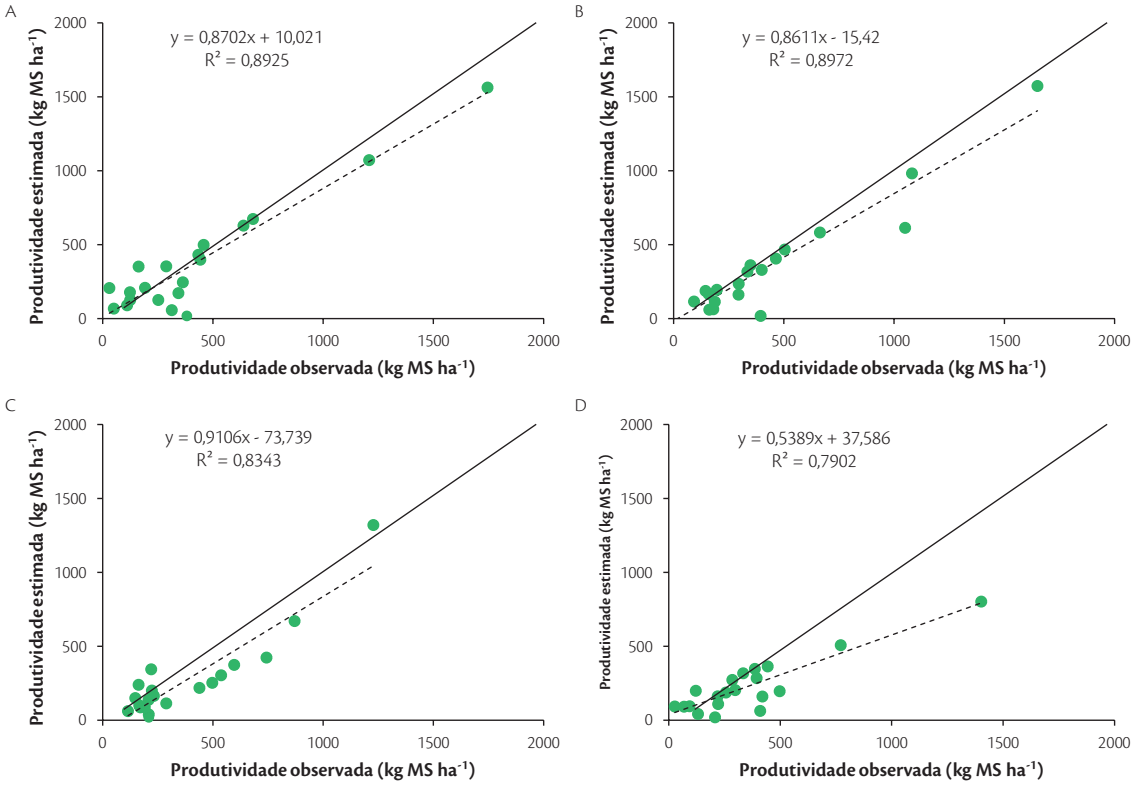


Figura 16.2. Relação entre as produtividades atingíveis observadas e estimadas pelo modelo FAO-MZA, para *U. decumbens* em sistema silvipastoril com árvores nativas, nas posições: (A) a 6 m do renque leste, (B) a 6 m do renque oeste, (C) a 2 m do renque oeste e (D) a 2 m do renque leste.
Fonte: Bosi (2014).

consistiram em simular apenas os efeitos da competição por radiação solar, simular apenas os efeitos da competição por água e nutrientes e, por fim, com metodologias de modelagem mais desenvolvidas, simular todos esses efeitos de forma conjunta.

Os dados experimentais utilizados para os referidos estudos de modelagem foram coletados no experimento ILPF-Corte. A primeira etapa desse experimento foi conduzida sob pastejo e condições de sequeiro, de dezembro de 2014 a janeiro de 2016, com as variáveis da pastagem sendo avaliadas em quatro distâncias em relação ao renque norte de eucalipto (0,00 m, 3,75 m, 7,50 m e 11,25 m) (Figura 16.3), tratadas como posições. A pastagem foi utilizada por bovinos de corte da raça Canchim em sistema de pastejo sob lotação rotativa. Os períodos de descanso e ocupação foram de 30 e 6 dias, respectivamente. A soma do período de descanso e do período de ocupação subsequente correspondeu a um ciclo de crescimento da pastagem (36 dias), totalizando 11 ciclos (Bosi et al., 2022).

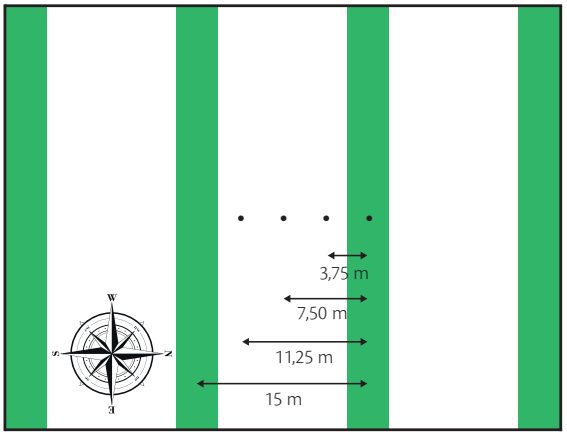


Figura 16.3. Croqui da área experimental do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) do experimento ILPF-Corte, representando os renques de árvores, o espaçamento entre renques e as posições de avaliação das variáveis experimentais.
Fonte: Bosi et al. (2022).

Em julho de 2016, dez árvores foram cortadas para estimar sua área foliar total média, que foi multipli-

cada pela população de árvores (0,0333 árvores m^{-2}), resultando no IAF para a área experimental total (1,97). Esse valor foi dividido pela fração da área experimental coberta pela copa das árvores (0,6), o que resultou no IAF médio considerando apenas a área coberta pela copa das árvores (3,28), requerido como entrada no modelo APSIM.

A umidade do solo foi medida duas vezes por semana com uma sonda capacitiva portátil, com medições a cada 0,1 m até 1 m de profundidade. Estações meteorológicas foram instaladas para medir a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), a temperatura e umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a precipitação pluvial, continuamente.

A partir de julho de 2016, foi iniciada a segunda etapa do experimento com o desbaste de 50% das árvores de eucalipto, resultando em um espaçamento de 15 metros entre renques e 4 metros entre árvores nos renques, o que proporcionou uma densidade de 167 árvores ha^{-1} (Fase 2, *ver* Capítulo 3). As coletas de dados da segunda etapa foram realizadas entre abril de 2018 e maio de 2019 (Balcão et al., 2024).

16.2.2.1 Simulações considerando apenas a competição por radiação solar

As primeiras simulações nesse sistema foram realizadas nos estudos de Bosi et al. (2020a, 2022), considerando-se apenas os efeitos do sombreamento das árvores sobre a pastagem. Para isso, foram utilizados dois modelos – o DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) e o APSIM –, e as simulações consistiram em substituir os dados meteorológicos dos arquivos desses modelos pelos dados medidos nas posições dentro do sistema silvipastoril. A radiação solar global, necessária nos modelos, foi estimada multiplicando-se a transmissividade da RFA, que foi medida nas posições do sistema, pela radiação solar global medida em condições padrão externas ao sistema (pleno sol). Os dados utilizados nesses estudos foram os provenientes da primeira fase de avaliação, anterior ao desbaste de julho de 2016.

16.2.2.1.1 Modelo DSSAT

O modelo utilizado no estudo de Bosi et al. (2020a) foi o CROPGRO (Boote et al., 1998), disponível na plataforma DSSAT. Esse modelo não é utilizado com frequência em sistemas de ILPF, visto que sua plataforma não possui modelos para simular o crescimento e a produtividade das árvores.

Dentro desse modelo foi criado o módulo CROPGRO-*Perennial Forage* para a simulação de pastagens perenes (Rymph et al., 2004), que foi validado por Bosi et al. (2020a) para estimar o crescimento da pastagem nas quatro posições do sistema silvipastoril descritas acima. No entanto, a plataforma DSSAT ainda não tem a capacidade de simular a competição por água no solo, nem de simular o crescimento de árvores ou a transmissão de radiação por suas copas em sistemas de ILPF. Portanto, as simulações consideraram apenas a competição por radiação solar, alterando a radiação solar no arquivo meteorológico.

As simulações da massa de forragem com o modelo CROPGRO-*Perennial Forage*, levando em consideração todas as posições do sistema silvipastoril, alcançaram precisão e exatidão de boa a muito boa (R^2 de 0,76 a 0,89 e NSE entre 0,71 e 0,86) e erro razoável (EM entre -7,83 e -88,52 kg ha^{-1}). Esses resultados indicam que o modelo é capaz de simular efeitos de sombreamento no crescimento da pastagem (Figura 16.4).

Para simulações de sistemas silvipastoris, a eficiência do modelo depende dos fatores que são mais limitantes para o crescimento da pastagem. Por exemplo, quando o sombreamento foi o principal fator limitante, o crescimento da pastagem foi bem simulado pelo modelo, mas quando o déficit hídrico foi importante (ciclo 7), o crescimento da pastagem foi superestimado (Figura 16.4). Isso se deve à ausência de capacidade do modelo para simular a competição por água nesses sistemas, o que deve diminuir a estimativa de água disponível no solo e, consequentemente, o crescimento da pastagem. Portanto, o modelo pode ser aprimorado para simular melhor os sistemas silvipastoris e as interações entre árvores, pastagens e animais, quando a competição por umidade do solo e nutrientes e os efeitos do pisoteio animal se tornam mais determinantes no crescimento da pastagem. Além disso, o modelo pode ser aprimorado para simular melhor os efeitos de sombreamento na partição e na estrutura do dossel forrageiro, que não estão bem representados nele. Esses problemas poderiam ser resolvidos nesta plataforma, criando modelos de crescimento de árvores e ferramentas para simular as interações entre árvores e culturas de forma satisfatória ou, se o foco for em espécies de sub-bosque, adicionando um modelo protótipo de árvore para simular apenas a competição (Bosi et al., 2020a).

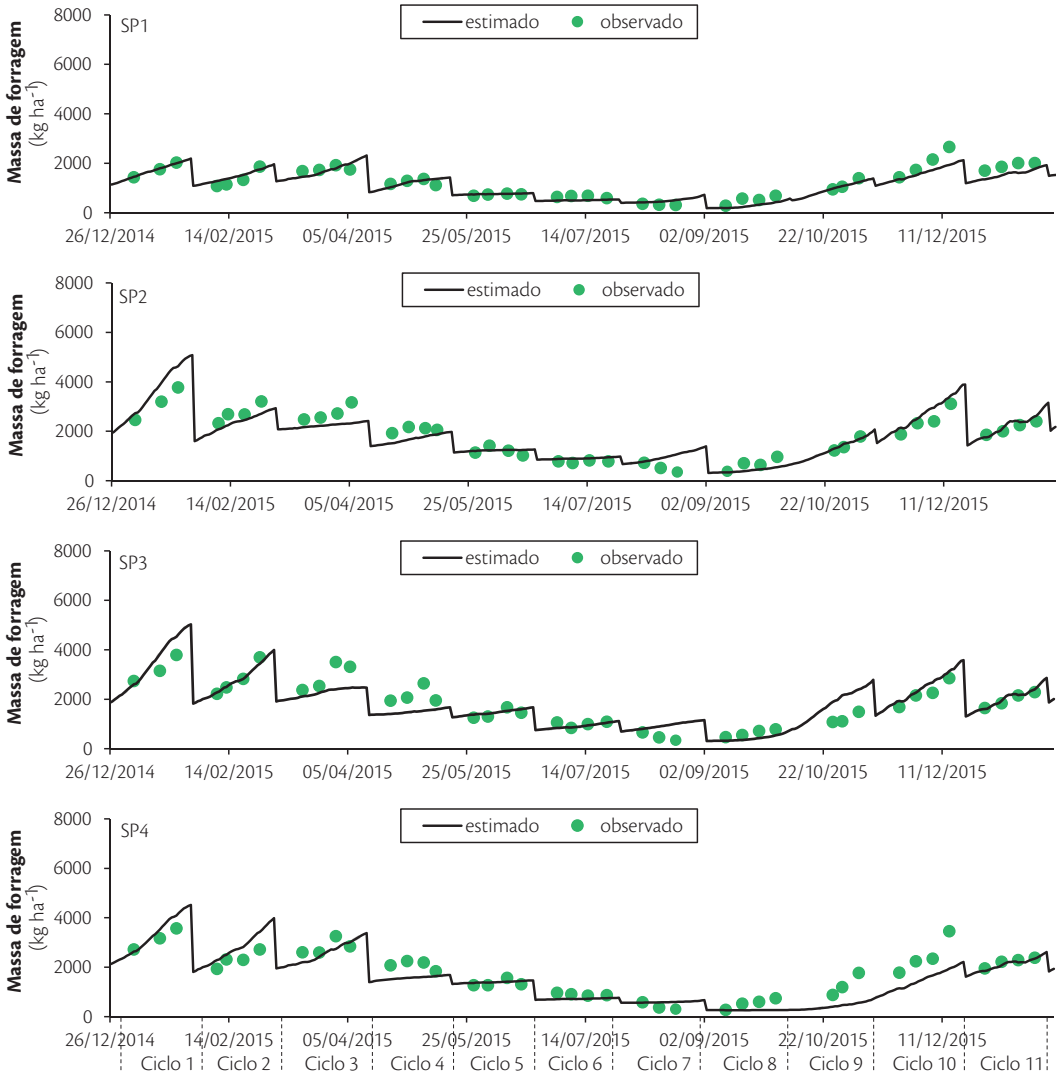


Figura 16.4. Massa de forragem observada e estimada, considerando apenas a competição por radiação solar e utilizando o modelo CROPGRO-Perennial Forage para simular o crescimento da pastagem nas seguintes posições: 0,0 m (SP1), 3,75 m (SP2), 7,50 m (SP3) e 11,25 m (SP4) do renque norte de eucalipto em um sistema silvipastoril.

Fonte: Bosi et al. (2020a).

16.2.2.1.2 Modelo APSIM

O modelo utilizado no estudo de Bosi et al. (2022) foi o APSIM, que é um modelo mecanicista composto por módulos desenvolvidos para simular processos biofísicos em agroecossistemas (Holzworth et al., 2014). O APSIM simula culturas, pastagens e árvores. Na versão APSIM *Next Generation*, o modelo responsável por simular as pastagens perenes tropicais é o APSIM-*Tropical Pasture* (Bosi et al., 2020b).

O estudo de Bosi et al. (2022) se concentrou na simulação do componente pastagem do sistema silvipastoril com o modelo APSIM-*Tropical Pasture*. Para isso, utilizou-se a parametrização de Bosi et al. (2020b) para o capim-piatã. A partir dessa parametrização, apenas os parâmetros para cálculo da AFE foram alterados. Isso foi feito para considerar o efeito do sombreamento no aumento da AFE, assumindo que a AFE é alterada quando a radiação incidente diária é inferior a 15 MJ m^{-2} d^{-1} por vários dias consecutivos, aumentando linearmente enquanto a radiação incidente diminui, atingindo um aumento máximo de AFE de 40% quando a incidência de radiação atinge zero e diminuindo linearmente enquanto a radiação incidente aumenta até 15 MJ m^{-2} d^{-1} (Bosi et al., 2022).

As séries temporais de dados observados e estimados de massa de forragem, considerando apenas a competição por radiação solar, são apresentadas na Figura 16.5. Os resultados demonstram que o modelo foi capaz de capturar diversas tendências relacionadas ao efeito das condições ambientais no crescimento da pastagem. As simulações alcançaram resultados relativamente bons, mesmo considerando apenas a competição por radiação solar, visto que esta foi o fator mais determinante para o crescimento da pastagem em todas as posições. Algumas superestimativas foram observadas para a massa de forragem durante os ciclos 1, 2, 10 e 11 (Figura 16.5).

As estimativas de massa de forragem alcançaram precisão de boa a muito boa (R^2 de 0,75 a 0,86), exatidão de insatisfatória a muito boa (NSE entre 0,32 e 0,85) e erros razoáveis (EM de -22,43 a 405,24 kg ha^{-1}). As simulações foram adequadas, considerando as dificuldades de simular o crescimento de pastagens em sistemas silvipastoris com pastejo. No entanto, em sistemas sob intensa competição por água e nutrientes do solo, essa abordagem de considerar apenas a competição por radiação solar é ineficaz. As principais restrições nas simulações com foco na competição por radiação solar foram a superestimação da massa viva de forragem durante os ciclos 1, 2, 10 e 11, que foram ciclos com

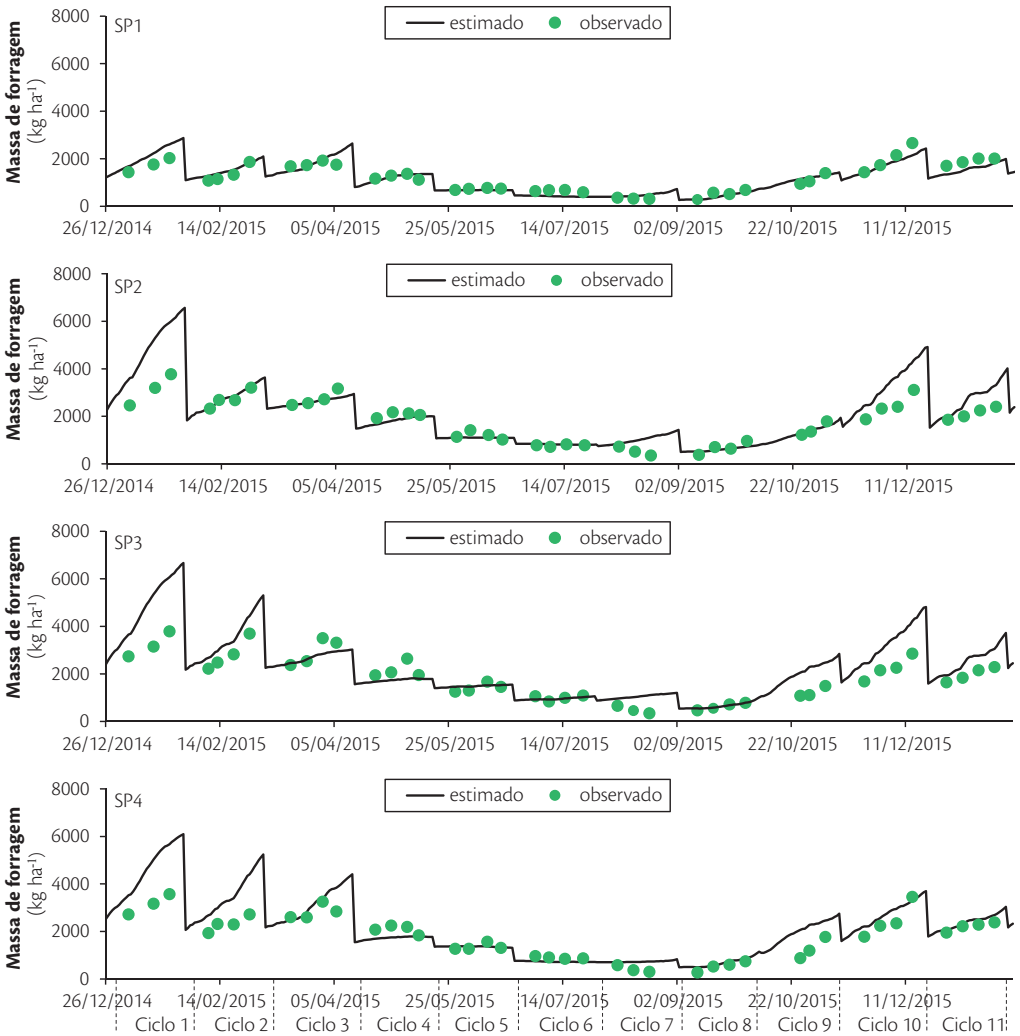


Figura 16.5. Massa de forragem observada e estimada, considerando apenas a competição por radiação solar e utilizando o modelo APSIM-Tropical Pasture para simular o crescimento da pastagem nas seguintes posições: 0,0 m (SP1), 3,75 m (SP2), 7,50 m (SP3) e 11,25 m (SP4) do renque norte de eucalipto em um sistema silvipastoril.

Fonte: Bosi et al. (2022).

maior massa de forragem e crescimento e, consequentemente, maior taxa de lotação e perdas de forragem causadas por pisoteio animal. Como o modelo não simula essas perdas de forragem, superestimações tendem a ocorrer, dependendo da quantidade dessas perdas (Bosi et al., 2022).

16.2.2.2 Simulação considerando apenas a competição por água e nutrientes

Também no estudo de Bosi et al. (2022) foi realizado o teste do modelo APSIM para a simulação, considerando apenas a competição por água e nutrientes. O conjunto de dados utilizado para esse teste também foi o proveniente da primeira fase do experimento, antes do desbaste de julho de 2016. O módulo *Slurp* (Agricultural Production Systems Simulator, 2021), disponível no APSIM, foi utilizado nas simulações para representar o componente arbóreo, como uma árvore estática, e permitiu definir a massa total da raiz da árvore, o comprimento específico da raiz e o IAF da árvore para calcular a transpiração. O módulo *Slurp* fornece uma representação simples de uma cultura e não prevê o crescimento, o desenvolvimento ou a produtividade da cultura, mas simula a absorção de água e nitrogênio (Agricultural Production Systems Simulator, 2021). Nesse estudo, o *Slurp* foi utilizado para representar as árvores competindo por água e nitrogênio. O IAF da árvore utilizado para os cálculos de transmissão de radiação foi definido como o valor estimado em julho de 2016, assumindo-se que foi o mesmo durante todo o período experimental. A massa total da raiz da árvore foi assumida como 1000 g planta^{-1} e o comprimento específico da raiz como 40 m g^{-1}, valores aleatórios utilizados apenas para testar o modelo, uma vez que esses valores não foram medidos para as árvores no experimento. As simulações foram realizadas utilizando uma abordagem de zonas de distribuição de raízes. Isso permite uma divisão de uma simulação silvipastoril em zonas de influência, sendo representadas pelas seguintes posições: a 0,00 m do renque norte, composta pela árvore e pela pastagens juntas, e a 3,25 m, 7,50 m e 11,25 m do renque norte, compostas apenas pela pastagem, mas com um *script* para adicionar alguma massa de raiz de árvore, a cada uma dessas zonas, para competir por água e enviar essa água para ser usada pelas árvores. A massa de raiz de árvore adicionada às três últimas posições foi de 1000 g planta^{-1}, o que resultou em uma massa total de raiz de árvore de 4000 g planta^{-1}.

A abordagem de zonas de distribuição de raízes calcula a transmissão de radiação por árvores através da lei de Beer-Lambert, mas considera que todo o sombreamento é projetado no pasto na posição a 0,00 m do renque. Essa suposição afeta negativamente as estimativas de distribuição de radiação e transpiração da pastagem. O modelo APSIM-*Tropical Pasture* foi utilizado para simular a pastagem, com as mesmas configurações descritas anteriormente para capim-piatã. Com as simulações de árvores e pastagem competindo por recursos, foram estimadas a água no solo e a massa de forragem, e esses dados foram comparados com os medidos no experimento descrito anteriormente (Bosi et al., 2022).

Séries temporais de água no solo observada e estimada, para as posições do sistemas silvipastoril, são apresentadas na Figura 16.6. O modelo foi capaz de estimar, efetivamente, as variações de água no solo para diversas condições. Para a posição a 0,00 m do renque norte, as simulações apresentaram precisão e exatidão insatisfatórias (R^2 = 0,48 e NSE = -1,25) e erro alto (EM = 30,2 mm). A representação do sombreamento da pastagem pelo modelo apresentou limitações importantes, especialmente em determinadas zonas onde foi estimado um sombreamento excessivo. Essa condição levou a subestimar a transpiração da pastagem, uma vez que o modelo presumiu menor disponibilidade de radiação solar incidente. Para as outras posições, alguns problemas foram identificados durante os períodos em que a pastagem estava sob sombreamento (entre abril e maio para a posição a 3,25 m, em abril e agosto para a posição a 7,5 m e de abril a junho para a posição a 11,25 m do renque norte). Uma vez que modelo assumiu que o sombreamento não ocorreu nessas zonas, ele superestimou a transpiração da pastagem e subestimou o conteúdo de água do solo durante esses períodos (Figura 16.6). Outros problemas ocorreram durante eventos de chuvas intensas em junho, julho e setembro de 2015, quando o modelo superestimou as recargas de água do solo. Contudo, as estimativas de umidade para essas posições ainda apresentaram desempenho entre satisfatório e muito bom (R^2 entre 0,70 e 0,80, NSE entre 0,60 e 0,77 e ME de 0,50 a 1,00 mm) (Bosi et al., 2022).

As simulações apresentaram tendência em superestimar a massa de forragem. As estimativas para essa variável apresentaram precisão insatisfatória para a posição a 0,00 m do renque norte (R^2 = 0,57) e

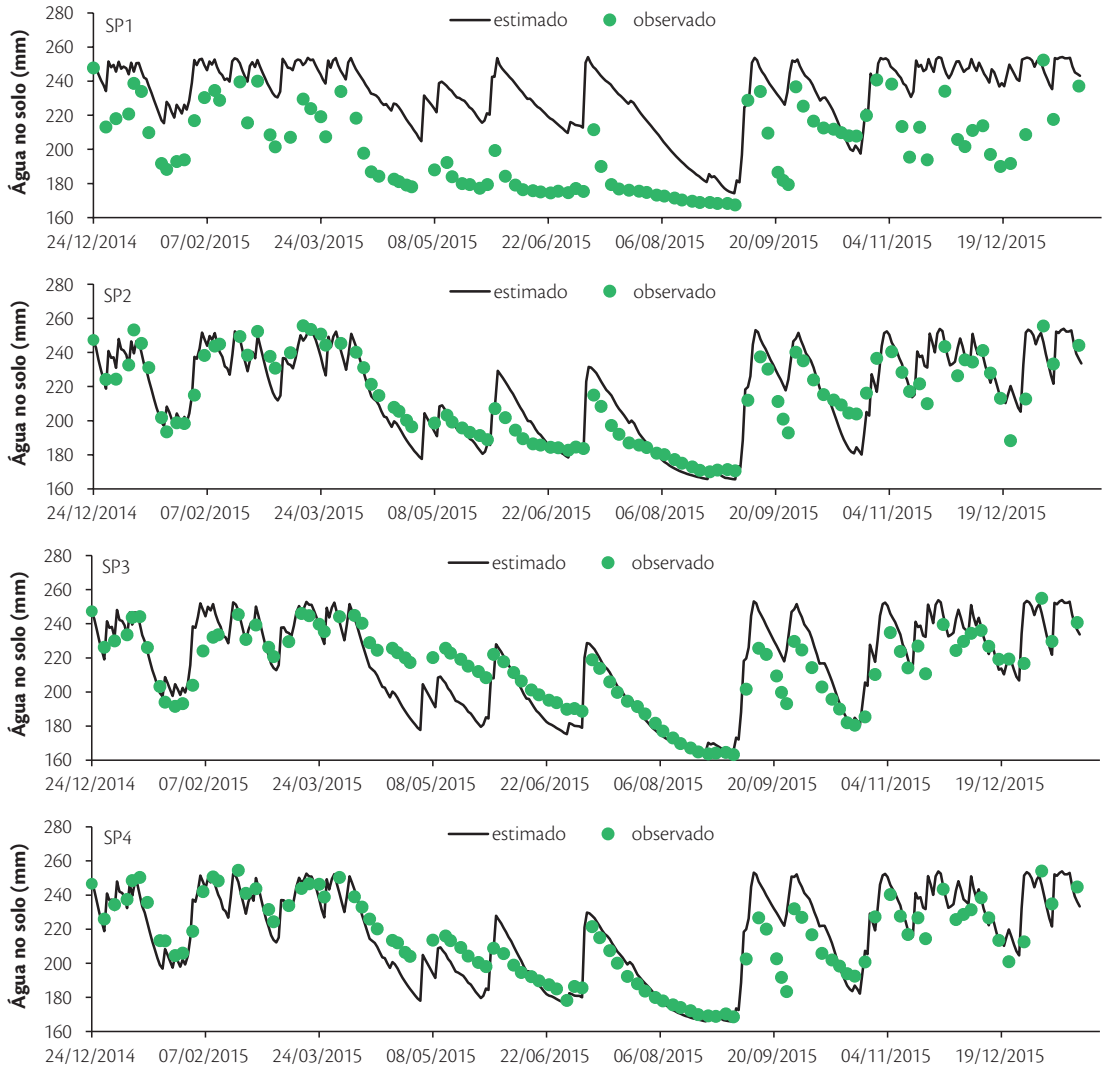


Figura 16.6. Conteúdo de água no solo observado e estimado até 1 m de profundidade, para as seguintes posições: 0,00 m (SP1), 3,75 m (SP2), 7,50 m (SP3) e 11,25 m (SP4) do renque norte de eucalipto em um sistema silvipastoril, utilizando os modelos APSIM-Slurp e APSIM-Tropical Pasture associados para simular a competição por água no solo entre pastagem e árvores.

Fonte: Bosi et al. (2022).

precisão muito boa para as demais posições (R^2 entre 0,81 e 0,87), exatidão insatisfatória para todas as posições (NSE de -5,32 a -1,20) e erro alto (EM entre 1087,3 e 1137,0 kg ha^{-1}).

Em suma, as simulações do crescimento da pastagem, considerando apenas a competição por água e nutrientes, não foram efetivas. Entretanto, as estimativas de água no solo usando a abordagem de zonas de distribuição de raízes foram adequadas, apresentando alguns problemas apenas para simular a transpiração da pastagem, o que foi causado pelo baixo desempenho do modelo para estimar o efeito de sombreamento nas forrageiras. Essa abordagem apresentou várias limitações, como a ineficiência para simular a transmissão da radiação solar através da posição avaliada entre dois renques de eucalipto, o que resultou em dificuldades para simular a transpiração da pastagem e, consequentemente, a umidade do solo e o crescimento da pastagem (Bosi et al., 2022).

16.2.2.3 Simulação considerando competição por radiação solar e por água e nutrientes em conjunto

O estudo de Balcão et al. (2024) foi realizado com o objetivo de desenvolver no modelo APSIM um método

que conseguisse simular, concomitantemente, o efeito do sombreamento das árvores e o da competição por água e nutrientes sobre o crescimento da pastagem. O conjunto de dados utilizado para esse estudo englobou as duas fases do experimento de sistema silvipastoril com eucalipto (antes e depois do desbaste de 50% das árvores), mantendo as mesmas posições para a simulação.

Nesse estudo, o modelo APSIM-*Slurp* foi configurado para simular árvores estáticas que interceptam parcialmente a radiação solar e extraem água do solo (Agricultural Production Systems Simulator, 2021). Por padrão, o modelo APSIM-*Slurp* utiliza um IAF de 5, um coeficiente de extinção da copa (K) de 0,65 e a altura da árvore de 5 m. Com essa configuração, a radiação interceptada pela copa das árvores foi em torno de 95% da radiação incidente, o que prejudicaria a simulação do crescimento da pastagem no modelo. Portanto, esses parâmetros tiveram que ser alterados para simular as árvores da área experimental. Foram calibrados valores mensais de K para simular a interceptação da radiação das árvores ao longo do ano. Para isso, foram calculados os valores diários de K usando a Equação 16.3 (Monsi; Saeki, 1953), considerando as medições diárias de radiação transmitida (Ii) realizadas em cada posição do sistema silvipastoril e a radiação solar global (Io) obtida em uma área próxima não sombreada pelas árvores, considerada como a radiação acima da copa das árvores. Posteriormente, para cada distância, foram calculadas as médias mensais dos valores de K. O IAF da copa das árvores foi considerado como 3,28, conforme calculado por Bosi et al. (2022), e a altura da copa das árvores foi de 30 m, conforme medições em campo. Foram utilizados nessa calibração os dados coletados no ano de 2018, pois este foi o ano com o conjunto de dados de radiação mais completo.

$$K = \frac{-ln\left(\frac{Ii}{Io}\right)}{IAF} \quad (16.3)$$

Os valores de K do modelo APSIM-*Slurp* calibrados são apresentados na Tabela 16.1. Na distância a 0,00 m do renque norte, os menores valores de K foram estimados para março e setembro (equinócio) e os maiores para junho e julho (inverno). Na posição a 3,75 m do renque norte, os menores valores de K foram estimados para janeiro e dezembro (verão) e os maiores para maio e julho (outono e inverno). Na posição a 7,50 m do renque norte, os menores valores de K foram estimados para janeiro, fevereiro, dezembro e novembro (primavera e verão) e os maiores valores para maio, junho e julho (outono e inverno). Na posição a 11,25 m do renque norte, os menores valores de K foram estimados em fevereiro, março e outubro (primavera e verão) e os maiores valores em junho e julho (inverno) (Tabela 16.1).

Tabela 16.1. Valores médios mensais de coeficiente de extinção (K) do APSIM-Slurp calibrados para 2018 de acordo com cada zona posição observada: 0,00 m (SP1), 3,75 m (SP2), 7,50 m (SP3) e 11,25 m (SP4) do renque norte de eucalipto em um sistema silvipastoril.

Mês	SP1	SP2	SP3	SP4
Janeiro	0,26	0,14	0,17	0,21
Fevereiro	0,29	0,20	0,17	0,15
Março	0,18	0,26	0,28	0,16
Abril	0,32	0,24	0,25	0,27
Maio	0,32	0,34	0,34	0,27
Junho	0,37	0,29	0,34	0,36
Julho	0,34	0,31	0,36	0,34
Agosto	0,32	0,28	0,25	0,25
Setembro	0,19	0,20	0,27	0,24
Outubro	0,25	0,27	0,20	0,14
Novembro	0,31	0,18	0,17	0,23
Dezembro	0,27	0,11	0,15	0,32

Fonte: Balcão et al. (2024).

Após a calibração do K, a interceptação da radiação solar pela copa das árvores foi simulada com desempenho satisfatório, considerando todas as distâncias juntas na análise (R^2 = 0,64, NSE = 0,60). As simulações desta variável nas distâncias 0,00 m e 11,25 m apresentaram desempenho superior aos de 3,75 m e 7,50 m do renque norte (Figura 16.7). Os valores ajustados representaram bem o efeito da declinação solar e da estrutura da copa das árvores, principalmente nas posições a 0,00 m e 11,25 m do renque norte. As simulações menos eficientes ocorreram nas posições a 3,75 m e 7,50 m e, provavelmente, se devem à variabilidade na projeção de sombra e ao efeito de sobreposição advindo do renque de árvores adjacente ao norte.

As simulações do conteúdo de água do solo em todo o perfil do solo foram satisfatórias. A camada mais superficial (0-30 cm) foi a simulada com melhor desem-

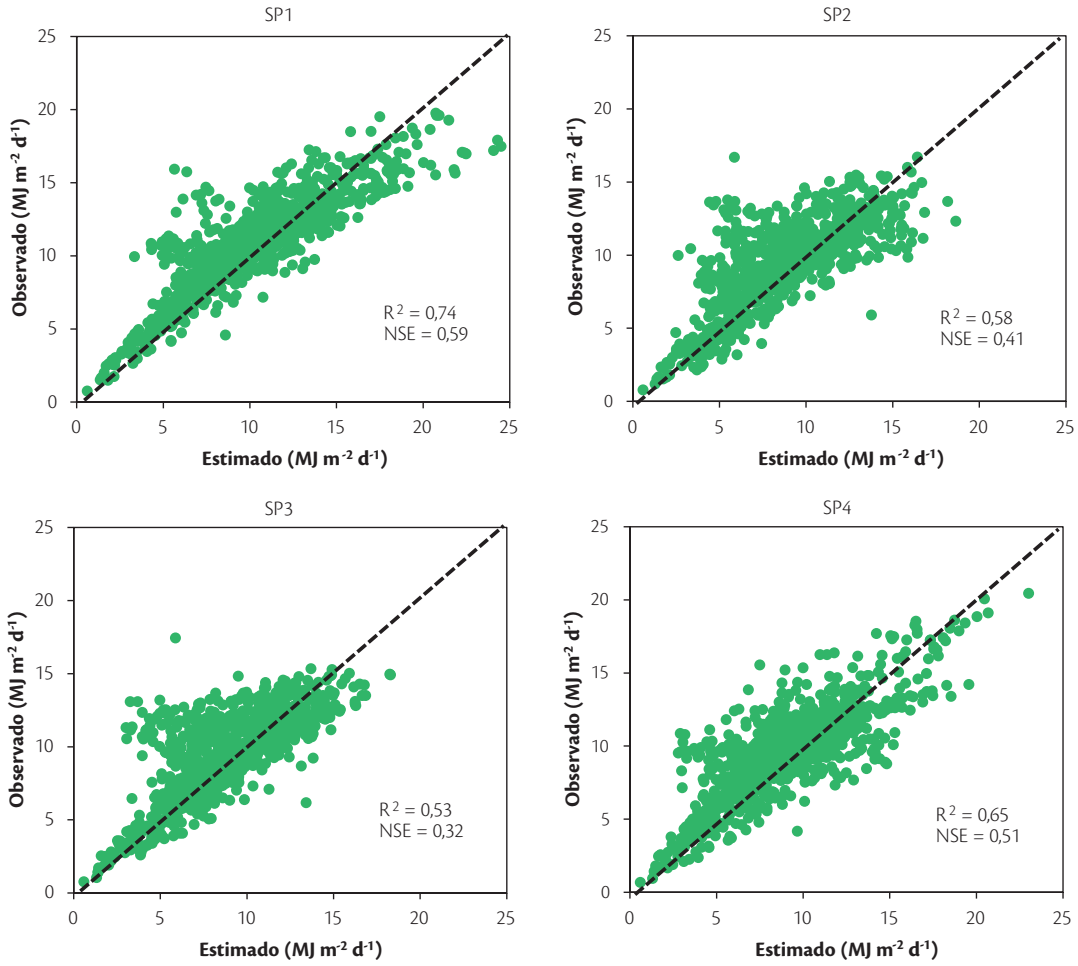


Figura 16.7. Relação entre valores observados e estimados da interceptação de radiação do dossel das árvores nas quatro zonas observadas de 2017 a 2019, nas posições 0,00 m (SPS1), 3,75 m (SP2), 7,50 m (SPS3) e 11,25 m (SPS4) do renque norte de eucalipto em um sistema silvipastoril. R^2 = coeficiente de determinação, NSE = eficiência de Nash-Sutcliffe.

Fonte: Balcão et al. (2024).

penho, seguida pela camada intermediária (30-60 cm) e pela camada inferior (60-100 cm), respectivamente (Figura 16.8). A simulação do perfil total do solo (0-100 cm) apresentou bom desempenho para todas as distâncias, exceto para a posição a 0,00 m das árvores.

Foi considerada a versão do APSIM-*Tropical Pasture* calibrada por Bosi et al. (2022) para simular o crescimento do capim-piatã, devido ao seu desempenho satisfatório nas simulações. A massa de forragem foi simulada pelo modelo com desempenhos de bom a muito bom, para ambas as fases experimentais (2014-2016 e 2018-2019). Apesar de leves superestimações durante os verões, as simulações representaram bem a tendência de crescimento da pastagem ao longo de todo o ano (Figura 16.9).

A simulação com os modelos APSIM-*Tropical Pasture* e APSIM-*Slurp* em conjunto foi um passo importante na simulação de sistemas silvipastoris, pois permitiu simular o crescimento da pastagem considerando tanto a radiação quanto a competição pela água do solo com as árvores. No entanto, ainda são necessárias melhorias, principalmente em relação à competição pela água do solo na região mais próxima das árvores. Para isso, dados específicos sobre a dinâmica da água no solo, como drenagem, escoamento e fluxo de água entre camadas do solo, podem auxiliar em calibrações futuras. Além disso, modelar o crescimento do eucalipto juntamente com o crescimento da pastagem e a competição por recursos resultante de seu crescimento certamente aumentaria a dinamicidade das simulações ao longo

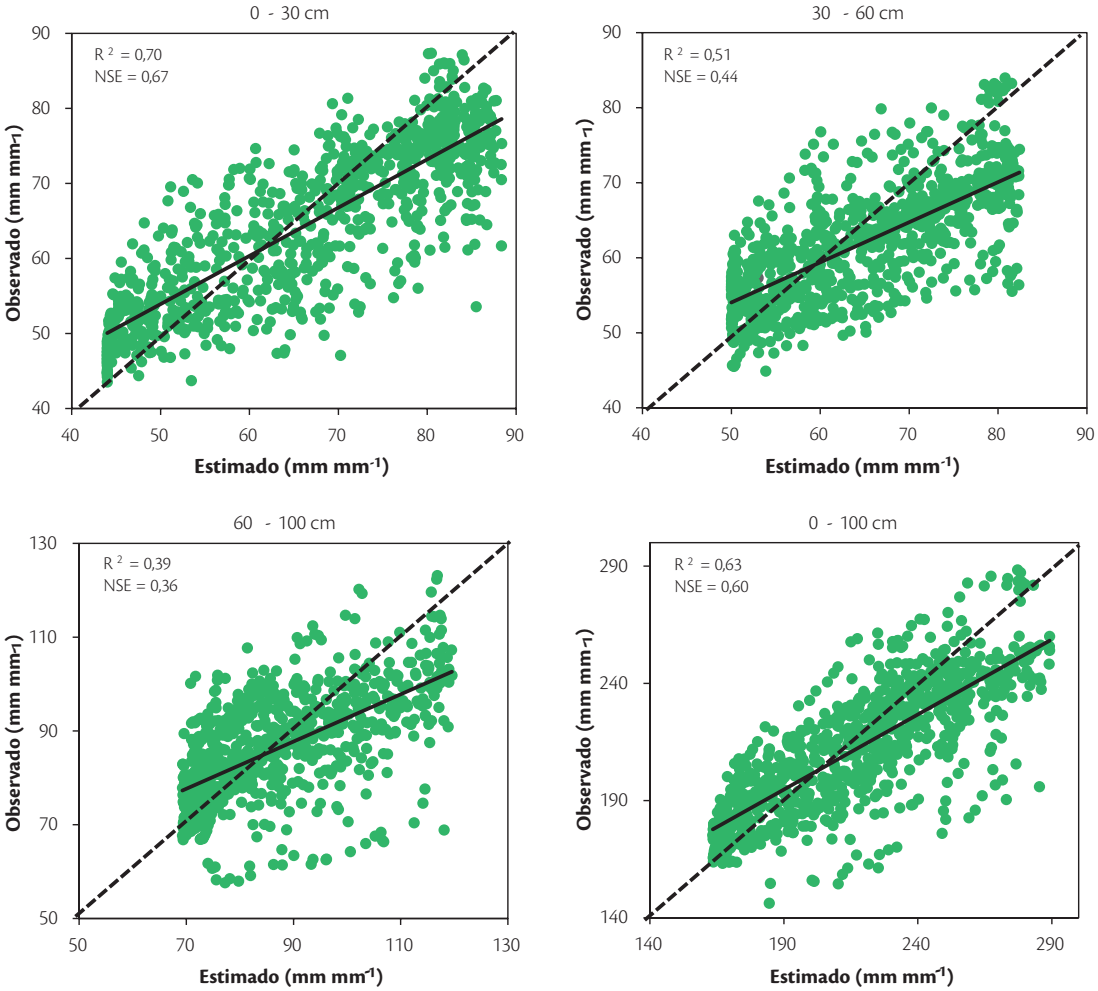


Figura 16.8. Regressão linear entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo, considerando todas as distâncias em conjunto. Cada gráfico representa uma agregação de camadas de solo (0-30, 30-60, 60-100 e 0-100 cm). R^2 = coeficiente de determinação, NSE = Eficiência de Nash-Sutcliffe.

Fonte: Balcão et al. (2024).

do tempo. Isso poderia ser feito em trabalhos futuros acoplando o modelo APSIM-*Eucalyptus* (Smethurst et al., 2020) à simulação do sistema silvipastoril, em substituição ao APSIM-*Slurp* e adicionando cálculos que distribuam o crescimento das raízes das árvores estimado pelo modelo de árvore, horizontalmente e verticalmente no solo, seguindo um padrão predeterminado relacionado à espécie arbórea. Adicionalmente, a inserção de um submodelo de transmissão de radiação solar no APSIM para simular a interceptação de radiação pelas árvores e a incidência de radiação solar em qualquer posição do sistema traria benefícios para a simulação de sistemas de ILPF.

16.2.3 Estimativa do crescimento e da produtividade de milho e braquiária em sistemas de integração lavoura-pecuária

Além dos estudos de modelagem de sistemas silvipastoris, a partir de 2017, iniciou-se o estudo de Bosi et al. (2023) com modelagem de outra modalidade de sistemas de ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste, a integração lavoura-pecuária (ILP), especificamente em sistema integrado de milho com pastagem de capim-piatã. Esse estudo consistiu em parametrizar o modelo APSIM para simular o crescimento e o desenvolvimento de híbridos de milho com aptidão para silagem, juntar essas parametrizações com a para-

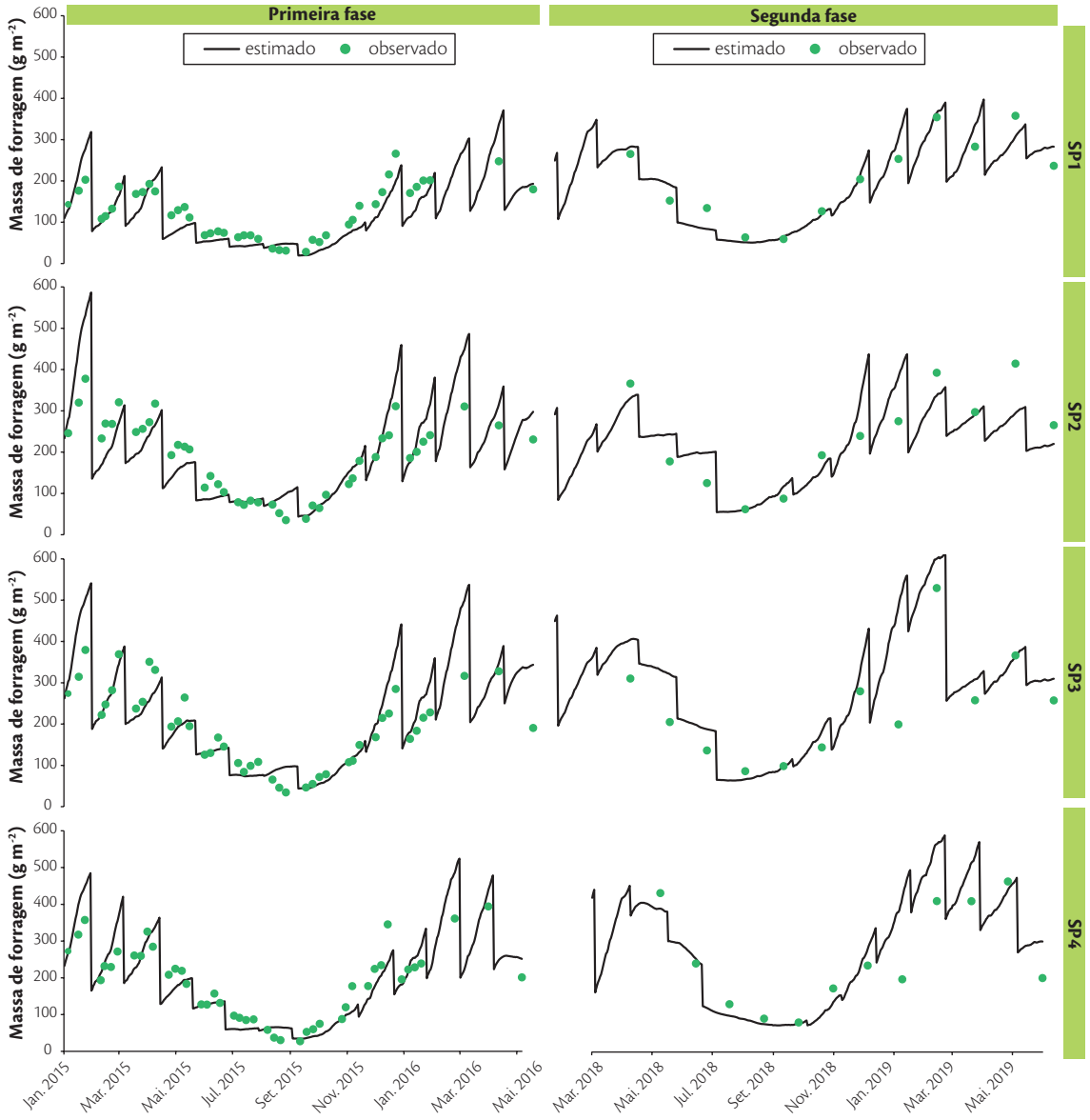


Figura 16.9. Massa de forragem estimada e observada ao longo dos dois períodos de avaliação, primeiro período (2014-2016) e segundo período (2018-2019), nas posições 0,00 m (SP1), 3,75 m (SPS2), 7,50 m (SPS3) e 11,25 m (SPS4) do renque norte de eucalipto em um sistema silvipastoril.

Fonte: Balcão et al. (2024).

metrização de Bosi et al. (2020b) para o capim-piatã e desenvolver a simulação de sistemas consorciados de milho e braquiária para produção de silagem.

Para gerar os dados necessários para a parametrização do modelo, foram conduzidos três experimentos na Embrapa Pecuária Sudeste. O primeiro experimento foi de 28/11/2017 a 15/03/2018 (sequeiro), o segundo experimento foi de 05/05/2020 a 14/09/2020 (irrigado) e o terceiro experimento foi de 16/11/2021 a 17/03/2022 (irrigado).

As coletas de dados biométricos das plantas foram iniciadas aproximadamente 30 dias após a emergência do milho, para todos os experimentos. Depois realizaram-se as coletas do milho e da pastagem a cada 14 dias até o final do ciclo do milho. O número de folhas e o florescimento do milho também foram monito-

rados. As variáveis agrometeorológicas radiação solar global, (RFA), temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e chuva foram medidas continuamente durante os experimentos.

Os modelos utilizados no estudo de Bosi et al. (2023) foram o APSIM-*Tropical Pasture* (Bosi et al., 2020b) e o APSIM-*Maize* (Brown et al., 2015). Na calibração do APSIM-*Tropical Pasture* e do APSIM-*Maize* para a estimativa do crescimento do capim-piatã e do milho consorciados, foi organizada uma simulação de culturas consorciadas, que permite a utilização de duas culturas em uma mesma simulação, estimando a competição dessas culturas por radiação solar, água no solo e nitrogênio.

Os resultados obtidos nas simulações da produtividade de milho para silagem e capim-piatã foram satisfatórios. Com relação às estimativas de biomassa total do milho, a precisão e a exatidão foram muito boas (R^2 entre 0,93 e 0,99 e NSE entre 0,92 e 0,99) e o erro foi de médio a baixo (EM = -16,3 a 774,9 kg ha^{-1}). A estimativa da massa de grãos apresentou desempenho ainda melhor (R^2 entre 0,99 e 1,00; NSE entre 0,98 e 1,00 e EM entre 8,1 e 178,8 kg ha^{-1}). Para chegar a esses valores, foi realizada uma calibração do modelo APSIM-*Maize* para considerar valores de parâmetros que levassem em conta as características de híbridos de milho para silagem. As principais alterações feitas foram referentes a parâmetros de fenologia da planta, eficiência de uso da radiação, partição de fotoassimilados, área foliar específica e senescência. Os resultados da simulação da biomassa total de milho ao longo dos experimentos (Figura 16.10) indicam que as simulações foram eficientes ao longo de todo o ciclo da cultura.

As simulações do crescimento do capim-piatã sob o milho foram satisfatórias. Os resultados para a estimativa de massa de forragem foram R^2 de 0,65 a 0,96;

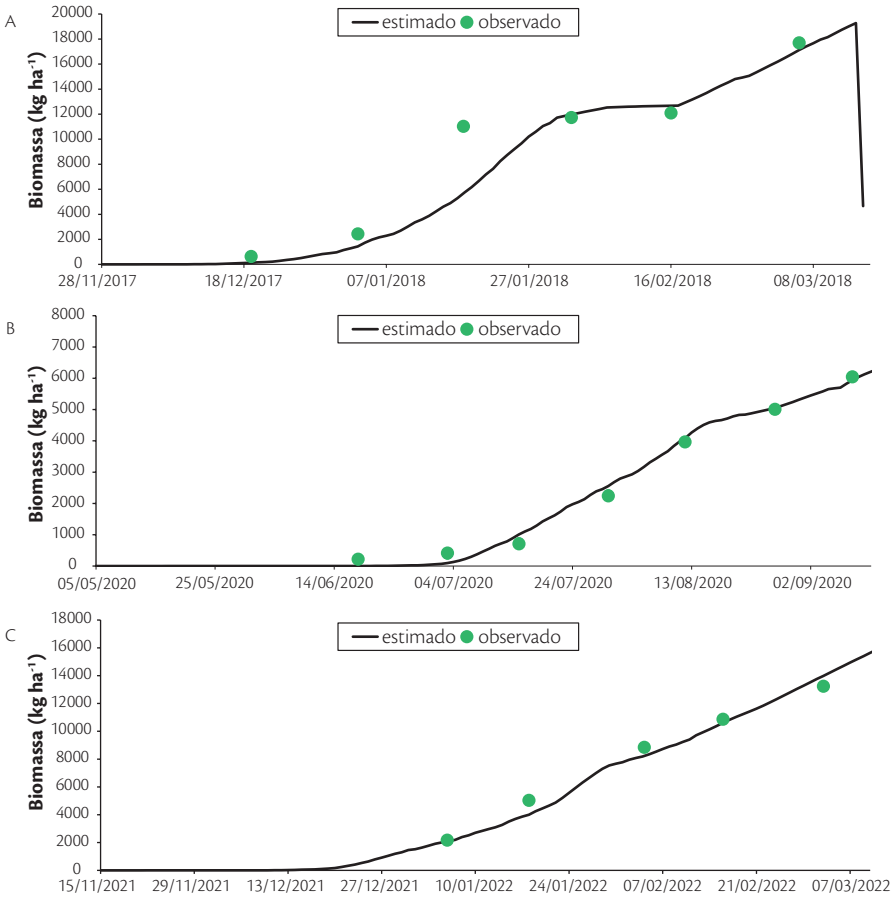


Figura 16.10. Biomassa aérea total observada e estimada para a cultura do milho para silagem em consórcio com capim-piatã, no Experimento 1 (A), Experimento 2 (B) e Experimento 3 (C).
Fonte: Bosi et al. (2023).

NSE de 0,50 a 0,80 e EM de 70 a -198,8 kg ha^{-1}. Para atingir esses resultados, foi necessário modificar o modelo original por meio da inserção de uma nova função para estimar a interceptação de radiação pela pastagem. Essa função calculou a radiação que chegou até o dossel forrageiro, descontando-se a radiação que foi interceptada pelo milho. Desse modo, a interceptação de radiação pela pastagem considerou somente a radiação que atravessa o dossel do milho. Além disso, foi necessário inserir uma função para modificação da partição de fotoassimilados em função da radiação interceptada, a qual aumenta a partição para o crescimento de colmos e diminui para o crescimento de folhas, quando há altos níveis de sombreamento (níveis de radiação abaixo de 15 MJ m^{-2} d^{-1}). Isso pode ser justificado pelo fato de as plantas alongarem seus colmos em busca de luz, quando são cultivadas em condições de sombreamento severo.

As simulações da massa de forragem de capim-piatã apresentaram bons resultados quando a pastagem foi cultivada sob o milho, exceto pelo último dado observado, em que ocorreu superestimativa pelo modelo (Figura 16.11). Isso demonstra que as modificações feitas no modelo foram adequadas para simular com eficiência as interações entre o milho e a pastagem, principalmente as competições por radiação solar, água e nitrogênio. Porém, há necessidade de se ajustar melhor os coeficientes que governam a simulação da pastagem no final do ciclo e depois da colheita do milho, quando há o aumento da incidência de radiação e o modelo superestima significativamente o crescimento da forrageira.

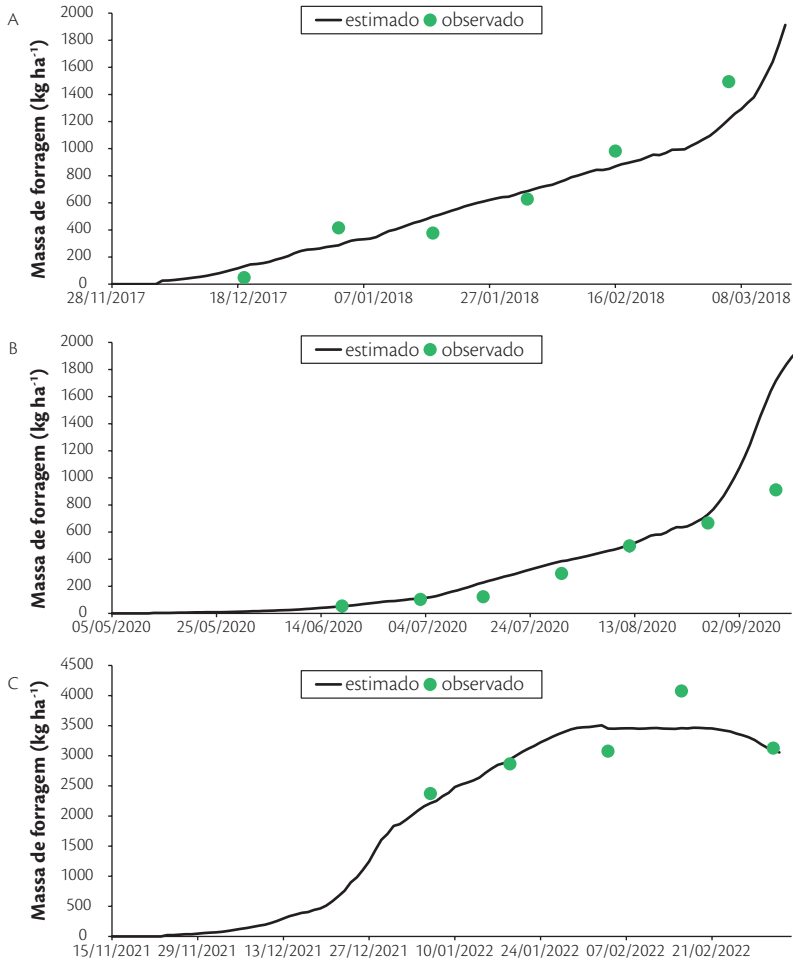


Figura 16.11. Massa de forragem observada e estimada para o capim-piatã em consórcio com a cultura do milho para silagem, no Experimento 1 (A), Experimento 2 (B) e Experimento 3 (C).

Fonte: Bosi et al. (2023).

16.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos de modelagem de sistemas de ILPF realizados na Embrapa Pecuária Sudeste proporcionaram grande avanço nesse tema, apresentando resultados consistentes e melhorando os modelos para a estimativa do crescimento e do desenvolvimento de pastagens em sistemas silvipastoris e de pastagens e culturas agrícolas em sistemas de integração lavoura-pecuária. Porém, ainda são necessários avanços nesses modelos para proporcionar a simulação dos sistemas como um todo, inserindo modelos para simular as árvores e implementando ferramentas que representem melhor as interações entre os componentes do sistema, bem como adicionando ferramentas para a simulação do crescimento e ganho de peso de animais. Esses avanços devem seguir por um caminho que leve ao desenvolvimento da simulação de sistemas de ILPF mais complexos, com a presença de árvores, culturas agrícolas, pastagens e animais, interagindo entre si, visto que ainda não existem estudos de modelagem que tratem de sistemas com todos esses componentes convivendo na mesma área.

16.4 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.

AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS SIMULATOR. **SLURP: the Sound of a crop using water**. 2021. Disponível em: https://apsimdev.apsim.info/ApsimX/Releases/2021.9.17.6802/Slurp.pdf. Acesso em: 16 set. 2021

BALCÃO, L. F.; ANDREUCCI, M.; SNOW, V.; HOLZWORTH, D.; BRUNETTI, H. B.; DOS SANTOS, M. L.; BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. Pasture growth simulation and sensitivity analysis using APSIM-related models in a tropical silvopastoral system. **European Journal of Agronomy**, v. 160, p. 127307, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127307.

BERGEZ, J.-E.; ETIENNE, M.; BALANDIER, P. ALWAYS: a plot-based silvopastoral system model. **Ecological Modelling**, v. 115, n. 1, p. 1-17, 1999. DOI: http://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00153-7.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N. B. The CROPGRO model for grain legumes, In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998, p. 99-128. DOI: http://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_6.

BOSI, C. **Interações em sistema silvipastoril: microclima, produção de forragem e parametrização de modelo para estimativa da produtividade de pastagens de Brachiaria**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícola – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. DOI: http://doi.org/10.11606/D.11.2014.tde-20032014-095630.

BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. CROPGRO-perennial forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102724, 2020a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102724.

BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N. I.; PEZZOPANE, J. R. M.; ANDREUCCI, M. P.; SANTOS, P. M. APSIM-Tropical Pasture: a model for simulating perennial tropical grass growth and its parameterisation for palisade grass (*Brachiaria brizantha*). **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102917, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102917.

BOSI, C.; HUTH, N. I.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M. APSIM model performance in simulating Piatã palisade grass growth and soil water in different positions of a silvopastoral system with eucalyptus. **Agricultural Systems**, v. 195, p. 103302, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103302.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRUNETTI, H. B.; CUADRA, S. V.; SANTOS, P. M. **Parametrização do modelo APSIM para estimativa da produtividade do consórcio milho-braquiária cultivado para produção de silagem**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2023. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 59).

BROWN, H. E.; TEIXEIRA, E. I.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P. **The APSIM Maize Model**. 2015. Disponível em: https://apsimdev.apsim.info/ApsimX/Releases/2021.03.09.6213/Maize.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

BURGESS, P. J.; GRAVES, A.; GARCÍA DE JALÓN, S.; PALMA, J. H. N.; DUPRAZ, C.; VAN NOORDWIJK, M. Modelling agroforestry systems. In: MOSQUERA-LOSADA, M. R.; PRABHU, R. (ed.). **Agroforestry for sustainable agriculture**. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing, 2019. p. 209-238. (Burleigh Dodds Series in Agricultural Science, 55). DOI: http://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.13.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

DUPRAZ, C.; WOLZ, K. J.; LECOMTE, I.; TALBOT, G.; VINCENT, G.; MULIA, R.; BUSSIÈRE, F.; OZIER-LAFONTAINE, H.; ANDRIANARISOA, S.; JACKSON, N.; LAWSON, G.; DONES, N.; SINOQUET, H.; LUSIANA, B.; HARJA, D.; DOMENICANO, S.; REYES, F.; GOSME, M.; VAN NOORDWIJK, M. Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2293, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/su11082293.

GILLESPIE, A. R.; JOSE, S.; MENGEL, D. B.; HOOVER, W. L.; POPE, P. E.; SEIFERT, J. R.; BIEHLE, D. J.; STALL, T.; BENJAMIN, T. J. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the mid-western USA: 1. Production physiology. **Agroforestry Systems**, v. 48, n. 1, p. 25-40, 2000. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1006285205553.

HOLZWORTH, D.; HUTH, N.; DEVOIL, P.; ZURCHER, E.; HERRMANN, N.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; VAN OOSTEROM,

E.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A.; BROWN, H.; WHISH, J.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L.; PEAKE, A.; POULTON, P.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P.; GAYDON, D.; DALGLIESH, N.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F.; WANG, E.; HAMMER, G.; ROBERTSON, M.; DIMES, J.; WHITBREAD, A. M.; HUNT, J.; VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P. S.; HARGREAVES, J. N. G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDORF, J.; WEDGEWOOD, S.; KEATING, B. APSIM e evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327-350, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009.

HUTH, N. I.; CARBERRY, P. S.; POULTON, P. L.; BRENNAN, L. E.; KEATING, B. A. A framework for simulating agroforestry options for the low rainfall areas of Australia using APSIM. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 171-185, 2002. DOI: http://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00103-X.

MOBBS, D. C.; CROUT, N. M. J.; LAWSON, G. J.; CANNELL, M. G. R. Structure and applications of the HyPAR model. In: AGROFORESTRY FORUM, 8., 1997, Cardiff. **Proceedings** [...]. Cardiff: University of Wales, 1997. p. 14–17.

MONSI, M.; SAEKI, T. On the Factor Light in Plant Communities and its Importance for Matter Production. **Shokubutsu Kenkyu Zasshi**, v. 14, p. 22-52, 1953.

PORFÍRIO-DA-SILVA, V. **Produtividade em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no subtrópico brasileiro**. 2012. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RYMPH, S. J.; BOOTE, K. J.; IRMAK, A.; MISLEVY, P.; EVERS, G. W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: developing physiological parameters. Gainesville. **Proceedings - Soil and Crop Science Society of Florida**, v. 63, p. 37-51, 2004.

SMETHURST, P. J.; VALADARES, R. V.; HUTH, N. I.; ALMEIDA, A. C.; ELLI, E. F.; NEVES, J. C. L. Generalized model for plantation production of *Eucalyptus grandis* and hybrids for genotype-site-management applications. **Forest Ecology and Management**, v. 469, p. 118164, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118164.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.

VAN DER WERF, W.; KEESMAN, K.; BURGESS, P. J.; GRAVES, A. R.; PILBEAM, D.; INCOLL, L. D.; METSELAAR, K.; MAYUS, M.; STAPPERS, R.; VAN KEULEN, H.; PALMA, J.; DUPRAZ, C. Yield-SAFE: a parameter-sparse process-based dynamic model for predicting resource capture, growth and production in agroforestry systems. **Ecological Engineering**, v. 29, n. 4, p. 419-433, 2007. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.017.

VAN NOORDWIJK, M.; LUSIANA, B. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 43, n. 1-3, p. 217-242, 1999. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1026417120254.

Capítulo 17

Estratégias de Comunicação

Cristiane Vieira Peres Fragalle, Gisele Rosso, Juliana Priscila Sussai



RESUMO: A Embrapa Pecuária Sudeste utilizou estratégias de comunicação integrada para fortalecer o conceito e a adoção do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Este capítulo explora a evolução dessas estratégias, acompanhando o avanço dos resultados da pesquisa no tema. Ao longo de 20 anos, de 2005 a 2025, foram desenvolvidas cerca de 850 ações de comunicação, que impactaram internamente e externamente. O texto destaca os marcos das ações utilizadas para divulgar o avanço da ciência e seus resultados, e para criar relacionamento com o público de interesse. As estratégias buscaram contribuir para aumentar a visibilidade dessa tecnologia e seus benefícios e para vincular a imagem da Embrapa Pecuária Sudeste ao tema ILPF no Estado de São Paulo.
Palavras-chave: Comunicação de C&T; Comunicação Integrada; Jornalismo Científico; Pesquisa Agropecuária.

ABSTRACT: Embrapa Pecuária Sudeste used integrated communication strategies to strengthen the concept and adoption of the integrated crop-livestock-forestry (ICLF) system. This chapter explores the evolution of these strategies, following the progress of research results on the subject. Over 20 years, from 2005 to 2025, approximately 850 communication actions were developed, impacting both internal and external audiences. The text highlights the milestones of the actions used to disseminate scientific advancements and results, and to build relationships with the target audience. The strategies aimed to increase the visibility of this technology and its benefits and to link the image of Embrapa Pecuária Sudeste to the ICLF theme in the State of São Paulo.
Keywords: Science and Technology Communication; Integrated Communication; Science Journalism; Agricultural Research.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-17

17.1 INTRODUÇÃO

Expandir a adoção da integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) – técnica inovadora e complexa, por suas múltiplas combinações – exigiu esforço além de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Desde o início, entendeu-se que o avanço científico deveria caminhar junto ao suporte estratégico da comunicação.

"A comunicação é uma das grandes forças dentro das instituições científicas" (Massarani; Dias, 2018, p. 64). De fato, o sucesso do avanço científico e tecnológico em instituições de pesquisa anda de mãos dadas com uma comunicação eficaz que, apesar de ser muitas vezes vista como um componente subestimado, é essencial pelo seu papel de extrapolar os muros da academia e traduzir a ciência em benefícios tangíveis para outros públicos (Zhu et al., 2024).

O sistema ILPF e a comunicação integrada (Kunsch, 2003) têm diversas semelhanças. Assim como a ILPF é complexa pela necessidade de combinar diversos componentes em um mesmo sistema, a comunicação integrada enfrenta desafios para atuar em suas diversas frentes. Em ambos há diversidade de atividades com necessidade de investir em diferentes áreas, ter bom planejamento, conhecimento técnico e capacidade gerencial para lidar com as várias atividades e interações.

Nesse contexto, a comunicação exerceu um papel fundamental na promoção dos sistemas ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste. Ao longo de 20 anos, de 2005 a 2025, a trajetória da ILPF foi marcada por avanços técnico-científicos, e também pela transformação na forma como foi sendo comunicada estrategicamente. A colaboração íntima entre P&D, Transferência de Tecnologia e Comunicação desempenhou um importante papel para ampliar a visibilidade e contribuir com avanços na adoção e na divulgação do conceito. A comunicação evoluiu paralelamente ao avanço das pesquisas no tema, e o acompanhamento de longo prazo permitiu a atuação da comunicação desde o início das pesquisas até seus resultados – etapas que apresentam desafios distintos. Uma outra característica a ser destacada foi a evolução da digitalização das estratégias, que até então eram mais aderentes a um modo *off-line* de comunicar e dependente da imprensa para chegar até o público de interesse, para o modelo *on-line*, o que ampliou a capacidade de alcance dessa comunicação.

Desde a implantação do primeiro experimento com integração lavoura-pecuária (ILP) na área de campo experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, diversas ações de comunicação foram desenvolvidas. Este capítulo destaca as principais ações e seus resultados. São estratégias que buscaram contribuir para vincular a imagem da Pecuária Sudeste ao tema ILPF no estado de São Paulo e, especialmente, para aumentar a visibilidade e valorizar a tecnologia, contribuindo para a sua adoção como parte de um esforço para a intensificação sustentável da agricultura brasileira.

17.2 OS PRIMEIROS ANOS

As pesquisas iniciais em um tema são mais desafiadoras para serem comunicadas por trabalharem ainda no campo das hipóteses, momento no qual ainda não se tem garantia de suas aplicações e impacto (Sawyer; Smith, 2024). Embora as pesquisas em ILP e ILPF tenham iniciado em meados de 2005 com a implementação do Sistema na Embrapa Pecuária Sudeste, foram necessários alguns anos para a obtenção de conteúdos que pudessem ser explorados em ações de comunicação. A atuação inicial consistia em acompanhar as pesquisas para obter conhecimento sobre o tema, promover os sistemas ILPF como suporte à comunicação científica e também pela divulgação na imprensa.

O trabalho se baseava na editoração de publicações como boletins de pesquisa, circulares e comunicados técnicos, especialmente entre os anos de 2006 e 2010. Nesse período, as publicações eram, em sua grande maioria, técnicas, e correspondiam às publicações da Série Embrapa voltadas à disseminação e à discussão de resultados de pesquisa, com linguagem mais técnica e rigorosa. Esses conteúdos eram acompanhados por um profissional de comunicação (jornalista) para encontrar oportunidades de divulgação junto à mídia e por um profissional de diagramação dessas publicações.

No início, quando os dados eram incipientes, típico da fase de implementação do Sistema, não havia a possibilidade de explorar recursos visuais, tão importantes para divulgar os dados científicos e os conceitos nos produtos de comunicação, pois o ILPF estava em fase de implantação. Havia limites desses recursos para ilustrar o que seria um sistema integrado e compor a diagramação de peças gráficas. Por outra via, sempre foi efetivo utilizar a penetrabilidade da Embrapa na imprensa para projetar o tema em jornais, revistas e, mais tarde, websites. Seguindo a dinâmica de evolução

das pesquisas, o esforço inicial era de levar ao conhecimento público as oportunidades de eventos técnicos, como cursos e dias de campo, buscando apresentar a ILPF e atrair interessados em adotar e multiplicar.

17.3 RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO INTEGRADA AO LONGO DA EVOLUÇÃO DA PESQUISA

A comunicação da Embrapa é tida como um "dos exemplos mais importantes de visibilidade para ciência e tecnologia geradas no país" (Bueno, 2006, p. 26). Ela é reconhecida pela sua competência, sendo orientada por uma política de comunicação que traz diretrizes, objetivos e valores que guiam suas ações (Embrapa, 2022). A partir de sua política, a Embrapa "incorporou os conceitos de comunicação integrada e planejada, abandonando o modelo de via única, centrado apenas na difusão de tecnologias" (Morais; Duarte, 2025). Esses conceitos pressupõem um planejamento com atuação convergente das diversas áreas da comunicação, sendo conhecido também como *mix* ou composto de comunicação (Kunsch, 2003).

A comunicação integrada (Figura 17.1) preconiza que uma instituição pode se relacionar com diferentes perfis de públicos e com a sociedade fazendo uso das diversas frentes de atuação da comunicação (relações públicas, jornalismo, editoração multimídia, marketing, atuação em feiras e exposições, entre outros) de forma articulada e planejada, convergindo para uma única estratégia ou tema, como é o caso utilizado para os sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Na imagem (Figura 17.1) é possível ver em negrito as frentes de atuação utilizadas nas estratégias da Embrapa Pecuária Sudeste.

A partir de 2011, com as pesquisas em ILPF obtendo resultados mais aplicados em diversas áreas de estudo (explanadas nos demais capítulos deste livro), a estratégia de comunicação integrada passa a ser utilizada

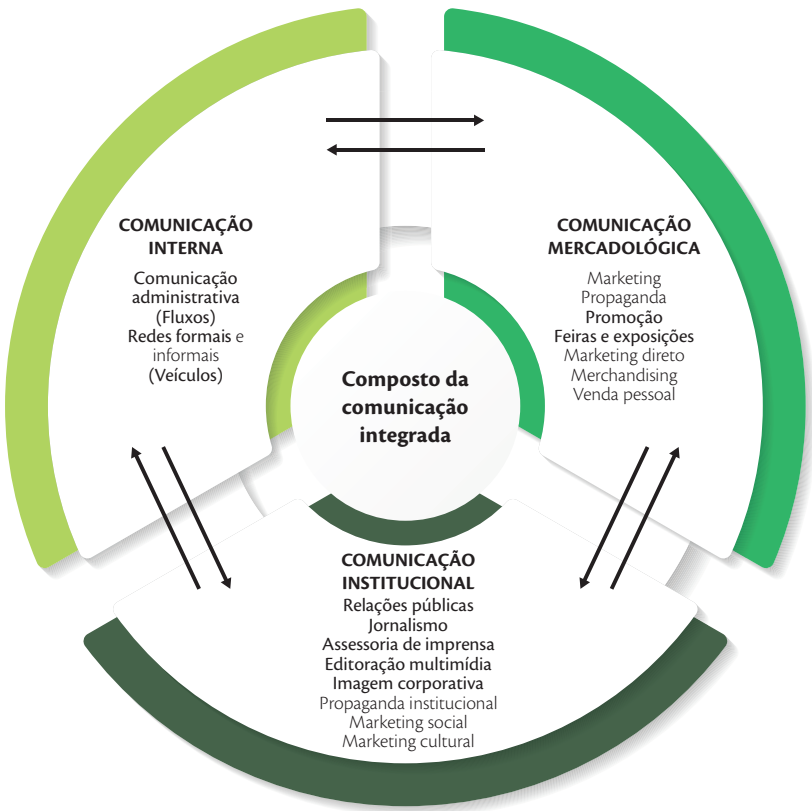


Figura 17.1. Modelo de comunicação integrada.
Fonte: Adaptado de Kunsch (2003).

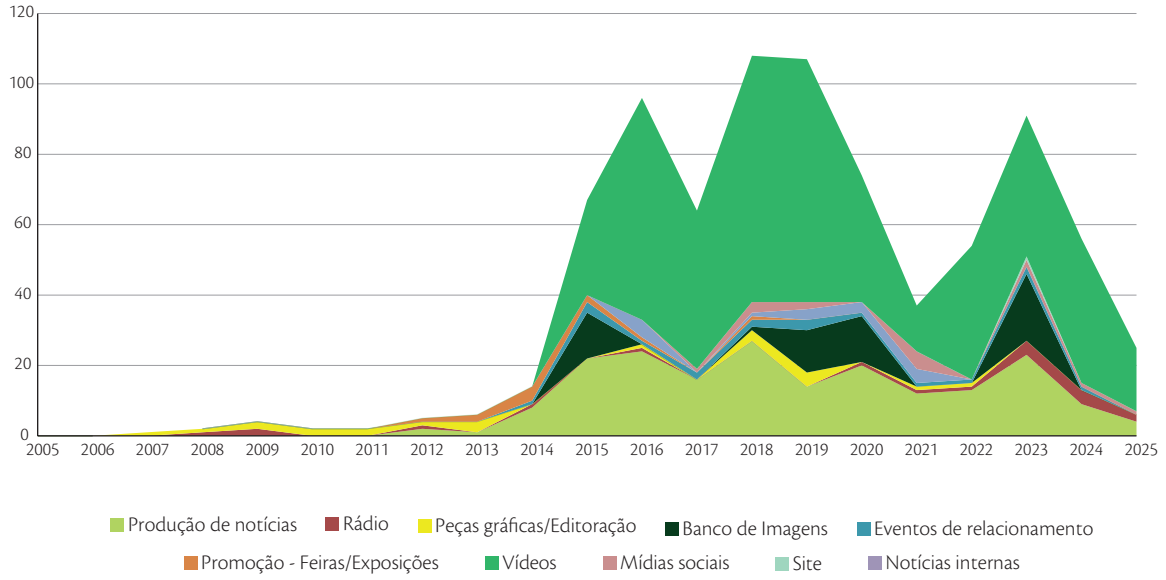


Figura 17.2. Evolução das ações de comunicação integrada para ILPF (2005-2025*).
*Dados até julho de 2025.

dando saída ao conhecimento por meio de diversas ações simultâneas. Foram realizadas cerca de 850 ações de comunicação entre 2005 e julho de 2025, e 90% delas ocorreram na segunda década, a partir de 2015 (Figura 17.2), acompanhando a evolução dos resultados das pesquisas sobre o tema em diversas frentes. Dessas ações, 53% foram feitas para o público interno e 47% para o público externo. A comunicação com o público interno assume um nível alto de importância pela necessidade de transparência, também para que esses reconheçam primeiramente o novo conceito, as pesquisas e seus resultados; bem como a aderência do tema com a agenda do centro de pesquisa.

As ações realizadas abrangeram desde a produção de matérias jornalísticas e programas de rádio para tornar público e ampliar a visibilidade, eventos de promoção e de relacionamento para engajar públicos diversos, o uso de mídias digitais para maior alcance e engajamento, a criação de vídeos e de um site temático para tornar o conteúdo mais acessível. Ao longo dos anos, também foi fundamental criar um banco de imagens sobre o tema, que, dentre outras vantagens, permitiu a repaginação de materiais gráficos e aumentar o apelo visual e a clareza das informações. Por outra via, também houve a permanente preocupação em criar ações voltadas para divulgar aos empregados o tema e os avanços relacionados às suas pesquisas.

17.3.1 Eventos institucionais como estratégia de relacionamento

Os eventos institucionais foram planejados como uma ação de comunicação que visa não apenas informar, mas mobilizar e se conectar a diferentes setores da sociedade. Esse tipo de evento extrapola a divulgação voltada para produtores rurais e técnicos da assistência técnica e extensão rural. Seu objetivo é promover os sistemas ILPF e apresentar a importância dos sistemas de produção sustentáveis. Integram essa agenda grupos de professores de ensino fundamental e médio de escolas particulares e públicas, estudantes de jornalismo de instituições de ensino superior – públicas e privadas do estado de São Paulo – que concorrem ao Prêmio ABAG/RP de Jornalismo "José Hamilton Ribeiro"[1], estudantes de ensino fundamental e médio. Ao longo desses 20 anos, o sistema ILPF foi apresentado para cerca de 300 estudantes de jornalismo, 400 professores e 3.000 estudantes de ensino fundamental e médio.

Para cada perfil de público foram pensados objetivos específicos de relacionamento. Com os profes-

[1] O Prêmio ABAG/RP de Jornalismo "José Hamilton Ribeiro" foi criado em 2008, com o objetivo de incentivar e reconhecer o trabalho jornalístico dedicado à divulgação de assuntos relacionados ao agronegócio regional e nacional. Tem duas categorias: a Profissional e a Jovem Talento, voltada para estudantes de jornalismo.

sores buscou-se gerar reflexão e aumentar conhecimento sobre sistemas sustentáveis, dotando-os de informação qualificada para trabalhar o tema com os alunos em sala de aula. Para os estudantes de jornalismo, buscou-se ampliar o conhecimento para reduzir preconceitos arraigados sobre a agropecuária, apresentando dados e resultados de pesquisa que permitissem escrever matéria jornalística consistente para concorrer ao prêmio. Já para os estudantes de ensino fundamental e médio, os objetivos são ligados ao Programa Embrapa & Escola, que busca "popularizar a ciência, restabelecer a ligação entre os ambientes urbano e rural, além de promover a reflexão sobre a importância da ciência e tecnologia para o setor agrícola e o meio ambiente" (Embrapa, 2025).

Em 2015, com o amadurecimento dos resultados da pesquisa em várias frentes de estudo, a Embrapa Pecuária Sudeste utilizou a estratégia de evento para promover o sistema ILPF e levar o público institucional a conhecer e valorizar a contribuição da pesquisa agropecuária para o desenvolvimento econômico do país e para o benefício da sociedade. O "Dia de Campo Pecuária Sustentável" (Figura 17.3) teve como objetivo apresentar a importância dos sistemas de produção sustentáveis: resultados, perspectivas e desafios; fomentar parcerias, fortalecer o relacionamento com as instituições participantes.

O perfil de público selecionado para este Dia de Campo incluiu lideranças do agronegócio e governamentais (do Executivo e Legislativo municipal, estadual e federal), instituições e organismos de fomento, empresas públicas e privadas ligadas ao agronegócio e à ciência e tecnologia, sociedade civil organizada e jornalistas especializados (TV, impresso, rádio e internet). A divulgação para esse perfil foi vista como estratégica seguindo a premissa de que, para a tecnologia ILPF ser amplamente adotada e gerar os benefícios esperados, é fundamental que haja um entendimento e um apoio generalizado, extrapolando a comunicação com o público técnico.

A expectativa era que esse perfil de público pudesse contribuir para transformar o conhecimento científico em ação prática, criando um ecossistema de apoio que inclui oportunidades de inovação e investimento em cadeias de valor mais sustentáveis, ajustes em cadeias de suprimento e nas operações de empresas, financia-



Foto: Gisele Rosso.

Figura 17.3. Dia de campo institucional Pecuária Sustentável.

mento e parcerias em P&D, programas de incentivo, regulamentação até formulação de políticas públicas e linhas de financiamento.

Para otimizar a comunicação, foi crucial considerar a adaptação da linguagem e o tempo de qualidade para interação e diálogo sobre o tema. Assim, foi previsto um dia reservado somente para jornalistas especializados e um segundo dia para os demais públicos. Essa decisão foi tomada com base na importância de aprofundar a mensagem, adaptar a linguagem e ter tempo suficiente da equipe de pesquisa para possíveis entrevistas. Cerca de 100 pessoas participaram dos Dias de Campo sobre Pecuária Sustentável, realizados na Embrapa Pecuária Sudeste (São Carlos/SP), nos dias 15 e 16 de outubro de 2015. No primeiro dia, o evento recebeu 30 jornalistas do estado de São Paulo. No segundo dia participaram 75 autoridades políticas e institucionais.

A dinâmica dos eventos consistiu em um percurso pelo caminho da pesquisa do campo à mesa. As seis estações da visita abordaram desde a criação de bovinos em sistemas ILPF até a degustação do produto em almoço comentado por pesquisadores. As estações apresentaram os temas componentes florestais, importância e diferentes arranjos dos sistemas, sistemas silviagrícolas com árvores nativas, uso pelos produtores, avaliação econômica e impacto das mudanças climáticas. Também foram incluídos tópicos complementares, como a pegada hídrica da carne e do leite, análise sensorial da carne, a eficiência de produção e a qualidade da carne. Na última estação, os participantes puderam degustar carnes bovina e ovina, que demonstraram os resultados tangíveis e a qualidade dos produtos de sistemas sustentáveis.

Ao longo desses 20 anos, a Embrapa Pecuária Sudeste apresentou o sistema ILPF para cerca de 300 estudantes de jornalismo, 400 professores e 3.000 estudantes de ensino fundamental e médio. Além deste público, o "Dia de Campo Pecuária Sustentável", que reuniu 100 participantes selecionados, é considerado um marco por ter dado ampla visibilidade ao sistema ILPF. A partir dele, o relacionamento com o poder público, parceiros públicos e privados e jornalistas foi intensificado, com desdobramentos na agenda de P&D, ações de transferência de tecnologias e divulgação na mídia. Jornalistas especializados passaram a utilizar a Embrapa Pecuária Sudeste como fonte para o tema no estado de São Paulo, aumentando a inserção na mídia. Esses resultados geraram valor intangível para a Embrapa Pecuária Sudeste, reforçando sua imagem como um centro de excelência em pecuária intensiva e sustentável.

17.3.2 ILPF na mídia: evolução do tema na imprensa

A Embrapa tem como premissa praticar uma comunicação legitimada pelo interesse da sociedade, pelo bem-comum e que contribua para melhorar a sustentabilidade econômica, social e ambiental. Faz parte de sua agenda levar ao conhecimento dos cidadãos informações que o ajudem na tomada de decisão, como, por exemplo, a adoção de práticas agropecuárias sustentáveis de produção.

Segundo Maria José da Costa Oliveira, "a comunicação pública assume o desafio de promover a educação com fim social, aproximar os diferentes setores, e desenvolver instrumentos de prestação de contas, informação e conscientização junto à sociedade" (Oliveira, 2004, p. 199). Divulgar o ILPF nos meios de comunicação vai além de levar informações aos setores interessados, objetiva qualificar a opinião do cidadão. Nesses 20 anos, desde a instalação do ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste, a promoção desses modelos na mídia está associada à educação, à reflexão e à ampliação desses sistemas no país, pensando em uma pecuária mais sustentável.

Como parte das ações de comunicação integrada, os esforços de ampliação do conhecimento dos cidadãos sobre os sistemas integrados geraram a produção de 195 matérias jornalísticas. Um levantamento sobre a reprodução dessas matérias em veículos de comunicação na mídia impressa e digital foi feito utilizando-se arquivos de clipagem[2], por meio do qual foram mapeadas 1.409 reproduções das matérias da Embrapa Pecuária Sudeste sobre ILPF em veículos de mídia[3] (Figura 17.4).

As primeiras notícias tinham foco na divulgação de eventos, como cursos e dias de campo organizados pela Embrapa Pecuária Sudeste. O primeiro Dia de Campo sobre o assunto ocorreu em 2007, e é a partir deste ano que são registradas algumas notícias na mídia sobre o evento.

[2] Processo contínuo de monitoramento, organização e análise de menções ou citações feitas na mídia.
[3] Entende-se por veículos de mídia jornais (impresso ou digital), TVs, programas de rádio e sites de notícias.

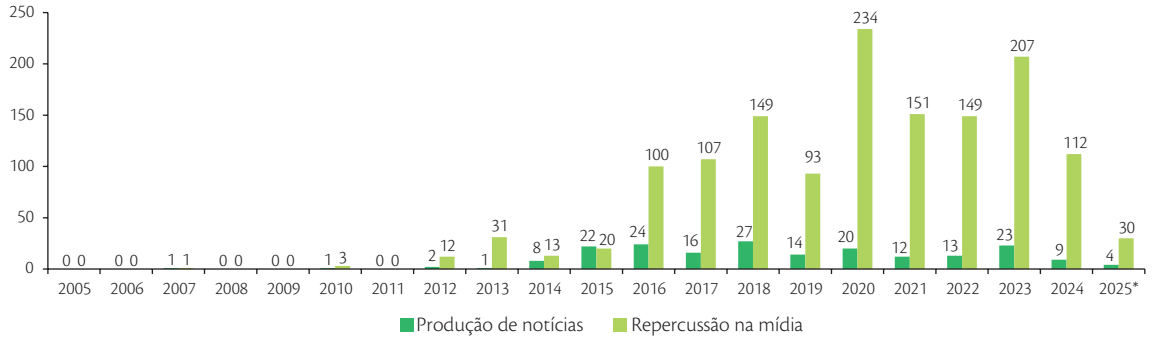


Figura 17.4. Produção de notícias sobre integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e impacto na mídia.

O foco das notícias em eventos da Embrapa Pecuária Sudeste sobre o ILPF permaneceu até 2014. A partir de 2015, alguns registros já relacionam a redução de emissão de gases de efeito estufa na pecuária ao sistema ILPF, tendo destaque na grande mídia. Em 2016, o número de notícias na mídia sobre ILPF aumentou significativamente, de 20 para 100 (Figura 17.4). Três aspectos podem ter contribuído para este aumento: (i) o Dia de Campo Institucional com jornalistas que estreitou o relacionamento com a mídia especializada; (ii) o avanço dos resultados aplicáveis da pesquisa com dados de interesse para construir matérias jornalísticas; (iii) o início da divulgação da pesquisa associada ao ILPF na Agência de Notícias da Embrapa[4].

A clipagem de 2017 mostra a escala de crescimento do ILPF na mídia (Figura 17.4), sendo o assunto de maior repercussão da Embrapa Pecuária Sudeste, com 107 inserções. A divulgação de eventos não é mais soberana; os dados da pesquisa aparecem mais equilibrados na divulgação. A partir de então, há um novo olhar da comunicação sobre esse tema, com dados científicos para divulgar. Com a mudança em relação ao tipo de informação divulgada, as inserções na mídia aumentam e o tema ganha relevância em veículos de comunicação importantes e de grande alcance nacional. A Embrapa Pecuária Sudeste e seus pesquisadores passaram a ser procurados pela imprensa de forma espontânea (Figura 17.5).

Além da mídia impressa, digital e televisão, o ILPF também ocupou espaço em programas de rádio. No Prosa Rural, da Embrapa, foram 11 programas veiculados sobre o tema. De 2021 a 2023, uma parceria com a rádio CBN, quinzenalmente na coluna Giro do Agro[5], entrevistava pesquisadores para falar sobre assuntos de Ciência e da Agropecuária. De 2023 a 2025, uma nova parceria, com a Rádio UFSCar no programa Fala Cientista – Embrapa em Campo[6]. Ao todo, 19 programas foram ao ar para divulgar os sistemas integrados.

PROSA RURAL

Programa de rádio da Embrapa que leva aos agricultores familiares e produtores rurais de diversas regiões do Brasil informações sobre tecnologias, produtos de baixo custo e fáceis de adotar que fazem a diferença no dia a dia do campo. Para saber mais, acesse nosso site pelo link: https://www.embrapa.br/en/prosa-rural/apresentacao ou utilize o QR Code abaixo:

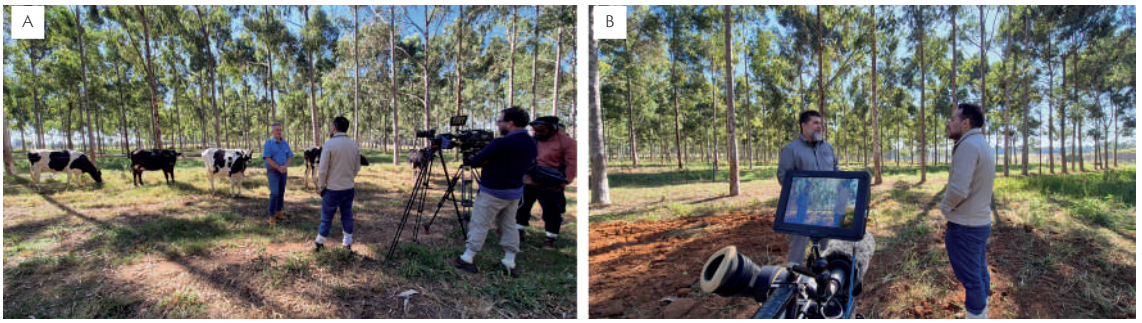
17.3.3 Mídias digitais para convergência

Os avanços tecnológicos provocaram diversas mudanças na forma como organizações aparecem na esfera pública, especialmente em razão da ampliação dos canais que passaram a ser utilizados (Castells, 2005). Ações em mídias digitais foram utilizadas para

[4] A Agência Embrapa de Notícias é um boletim semanal enviado a cerca de 10 mil jornalistas cadastrados, contendo três matérias inéditas sobre a pesquisa científica da Embrapa. É um serviço oferecido gratuitamente pela Embrapa a empresas, profissionais de comunicação, jornalistas, articulistas, formadores de opinião e seus multiplicadores (blogueiros, youtubers, etc.) (Embrapa, 2024).

[5] O programa da CBN foi extinto e o link de acesso foi desativado.

[6] O Fala Cientista - Embrapa em Campo está disponível no podcast da Rádio UFSCar, no Spotify.



Fotos: Gisele Rosso.

Figura 17.5. Gravação de entrevistas sobre integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) para programas de TV.

promover o conceito da ILPF, seus resultados, tecnologias e os eventos da Embrapa Pecuária Sudeste sobre o tema, além de tornar a ciência mais acessível ao cidadão. Foram utilizadas, para esse fim, três redes sociais corporativas da Embrapa – Facebook, Instagram e LinkedIn.

A produção de conteúdo local foi associada ao perfil da Embrapa em cada canal e segmento de público que se queria alcançar. Textos, imagens e vídeos foram escolhidos cuidadosamente para reter a atenção dos usuários e converter sua atenção em atitudes, tais como ler uma notícia, acessar uma publicação, efetivar uma inscrição em evento, assistir a um vídeo sobre ILPF, entre outras ações.

A primeira experiência do centro de pesquisa com postagem sobre o tema ILPF em rede social da Embrapa ocorreu em agosto de 2017. Desde então, o esforço em trabalhar nesse ambiente mostrou ser indispensável, uma vez que a presença da Embrapa em redes sociais é marcada por forte visibilidade e alcance de público. Até agosto de 2025, contava com mais de 532 mil seguidores no Instagram; 317 mil no LinkedIn; e 169 mil no Facebook. Para promover a ILPF nesse ambiente, é essencial que as mídias sociais não sejam tratadas como um fim em si mesmas, sendo elas propulsoras de acesso a conteúdos técnico-científicos, notícias, vídeos, anteriormente publicados e disponibilizados em plataformas ou repositórios virtuais. Assim, as métricas das redes sociais[7] são acompanhadas sistematicamente, incluindo os números de alcance e engajamento, sem deixar de aferir a conversão que o conteúdo foi capaz de promover, seja para acesso a uma notícia sobre a tecnologia, seja para uma nova publicação técnica.

17.3.3.1 Uso de vídeos e a acessibilidade

Os vídeos, em geral, facilitam a comunicação entre uma organização e seus públicos. Nesse novo modelo de mídia propagável, o público tem um papel ativo na propagação do conteúdo, em vez de servir apenas como passivo da mídia viral (Jenkis, 2014). A importância dos vídeos para comunicar C&T está na sua capacidade de apresentar informações técnicas de forma mais acessível e envolvente para um público amplo. No contexto da Embrapa, também contribuiu para que informações sobre uma nova prática agropecuária ou tecnologia supere os limites geográficos e chegue mais facilmente até o público-alvo. Foi por isso que, no ano de 2016, os vídeos passaram a fazer parte da estratégia de divulgação dos sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste. Eles foram criados pela equipe de comunicação e disponibilizados no canal da Embrapa no YouTube[8] para disseminar resultados, conceitos e vantagens desses sistemas, complementando as referências técnicas das publicações escritas.

O acesso aos vídeos com foco nos temas da ILPF disponíveis no YouTube atingiu mais de 77.000 visualizações em 2025 (Figura 17.6). Essa estratégia facilitou o acesso à informação qualificada pelos interessados, que, conforme a sociedade em geral, mudou seu modelo de consumo baseado na lógica midiática (Hjarvard, 2012). A disponibilidade do material na plataforma digital permite ao usuário a consulta a qualquer momento usando ferramentas de busca intuitivas. Além disso, a linguagem utilizada nos vídeos

[7] As métricas das mídias sociais são aferidas desde 2017. No entanto, essas métricas foram alteradas pelas plataformas entre 2017 e 2025. Por esse motivo, não é possível apresentar esses dados em uma linha do tempo.

[8] Em agosto de 2025, o canal da Embrapa no YouTube mantinha 388 mil seguidores.

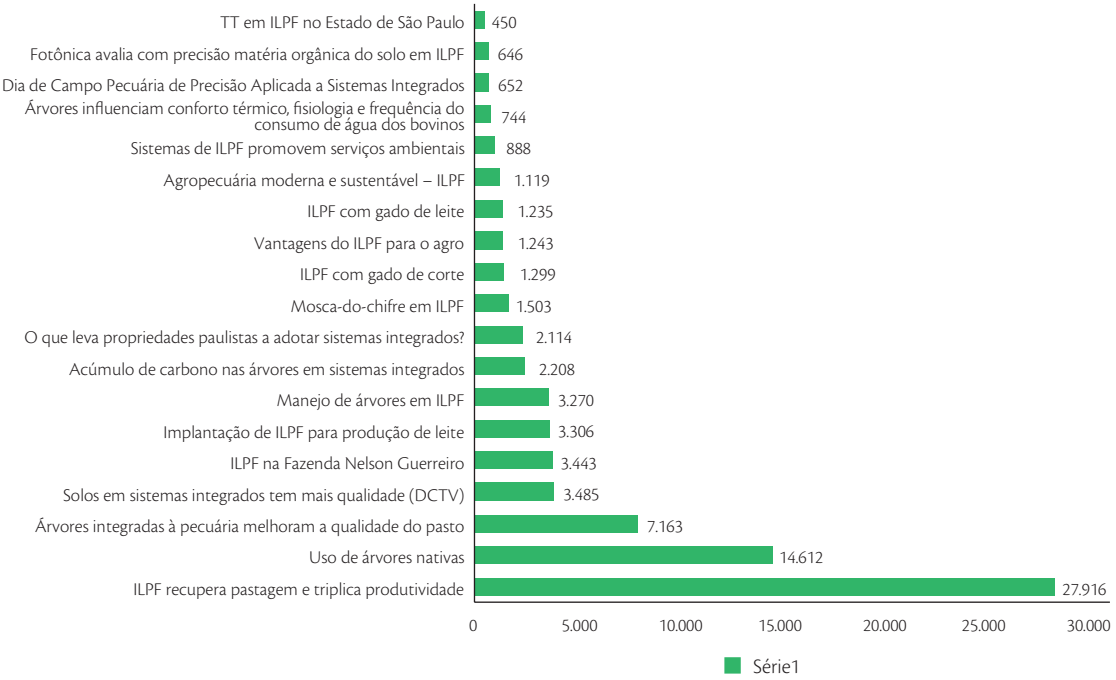


Figura 17.6. Visualizações dos vídeos de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste no YouTube.

ILPF NO YOUTUBE

Para assistir aos vídeos produzidos pela Embrapa Pecuária Sudeste sobre o sistema ILPF, **clique aqui** ou utilize o QR Code abaixo:

da Embrapa e da Rede ILPF favorece a universalização do consumo.

O acesso ao formato de vídeos curtos (com oito minutos ou menos) tem sido um indicador da preferência do público. No princípio, os conteúdos dos vídeos produzidos tinham uma duração média de pouco mais de seis minutos. Conforme a dinâmica do consumo desses produtos audiovisuais foi sendo transformado pelas plataformas como YouTube, Reels e TikTok, a partir de 2019 essa média foi reduzida para dois minutos e dezenove segundos. Em geral, o conteúdo é técnico e busca promover o conhecimento sobre o tema e tecnologias que podem ser adotadas. Um efeito secundário e relevante é o alcance dos jovens, que geralmente não são alcançados pelas ferramentas tradicionais de comunicação científica e são pouco conscientes sobre a importância da pesquisa agrícola para o estilo de vida urbano contemporâneo.

17.3.3.2 Página temática sobre ILPF no Website

À medida que a produção científica evoluiu, a vitrine para todo o arcabouço de conteúdo produzido precisou acompanhar essa evolução. Em 2023, com a diversidade de conteúdos digitais disponíveis sobre a tecnologia, foi criada uma página temática no website da Embrapa Pecuária Sudeste, onde foram organizados artigos científicos, agenda de eventos, vídeos, notícias e outros materiais digitais destinados a técnicos, produtores rurais e outros públicos interessados na temática. Nesse período, as visitas à Unidade Demonstrativa no campo experimental da Embrapa Pecuária Sudeste estavam em franca ascensão. Para se ter ideia, somente em 2024 a Embrapa Pecuária Sudeste recebeu 17 missões estrangeiras de 25 países dos cinco continentes, somando 114 visitantes interna-

cionais. A maioria dessas delegações visitou as áreas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) tanto com gado de leite, como gado de corte.

A criação da página aglutinando todo conteúdo relativo à tecnologia foi oportuna para promover aos visitantes, de estudantes a executivos de grandes empresas, todo o conhecimento produzido e disponível em mídias digitais, a fim de que pudessem complementar as informações recebidas durante a experiência presencial.

A estratégia se fundamentou em reunir todas as informações da Embrapa Pecuária Sudeste sobre o assunto em um só lugar e facilitar o acesso a orientações, recomendações técnicas e resultados de pesquisas relacionados a sistemas integrados. Também, uma nova placa de identificação da área experimental de ILPF foi produzida e instalada no local de visitação com código de barras bidimensional estampado, podendo ser lido por câmeras de smartphones, e direcionar o visitante à página temática no website da Embrapa Pecuária Sudeste (www.embrapa.br/pecuaria-sudeste/ilpf). Desde que foi criada, em novembro de 2023, e na primeira checagem para relatório, em dezembro de 2023, a página totalizou 932 acessos de 235 pessoas. Até agosto de 2025, a página recebeu mais de 1.800 visitas.

CONECTE-SE À ILPF – EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE

Para acessar a página da ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste **clique aqui** ou utilize o QR Code abaixo:

17.3.4 Repaginação de materiais gráficos

No ano de 2019, a gestão de comunicação da Rede ILPF abriu a oportunidade para planejamento e produção de materiais gráficos, destinando recursos financeiros para que as Unidades de pesquisa pudessem ampliar a divulgação de seus resultados. Assim, conteúdos técnicos foram traduzidos em fôlderes e cartilhas, utilizando linguagem, formatos, recursos gráficos e acabamentos especiais para agregar atratividade visual a um projeto gráfico alinhado com a nova marca da rede ILPF (Figura 17.7). Foram desenvolvidos um fôlder e três cartilhas para atender tanto o público institucional quanto o técnico. Também foram desenvolvidas peças gráficas de comunicação visual para distribuição em 11 feiras/exposições agropecuárias que a Embrapa Pecuária Sudeste participou em anos subsequentes para divulgar o sistema ILPF.

17.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo abordou o uso de estratégias de comunicação integrada que foram utilizadas pela equipe de comunicação da Embrapa Pecuária Sudeste para fortalecer o conceito e a adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ao longo de 20 anos de pesquisa. O texto ressalta os resultados e o impacto positivo dessas estratégias.



Figura 17.7. Exemplos de material gráfico produzido.

Ter uma equipe de comunicação com atuação sinérgica junto à área de P&D atuando em sistemas ILPF possibilita a compreensão dos desafios inerentes à pesquisa e o acompanhamento dos avanços nos resultados, o que rende oportunidades para ações de comunicação mais estruturadas ao longo de todo o processo de pesquisa. Esse acompanhamento permite aos profissionais, também, uma compreensão mais apurada da pesquisa, e construir um arcabouço de insumos materiais, como fotografias e vídeos, essenciais para planejar ações nas mídias digitais e desenvolver peças de comunicação. Ainda, pode ajudar no entendimento dos temas, do contexto, das parcerias envolvidas, nas questões que envolvem propriedade intelectual, dos riscos e vantagens envolvidos e dos termos que precisam ser compreendidos e codificados para facilitar o entendimento do público.

Como impacto, essa trajetória estratégica da comunicação contribuiu com o aumento gradual das buscas por grupos de visitantes, nacionais e internacionais; e o aumento da procura espontânea de profissionais da imprensa por fontes da Embrapa Pecuária Sudeste para entrevistas sobre ILPF. Esses são importantes sinais do resultado positivo da atuação muito próxima entre as áreas de pesquisa e de comunicação.

Essa parceria entre P&D e comunicação pode ser estendida para outras tecnologias. Ainda, projetos disruptivos ou mais desafiadores, com temas na fronteira do conhecimento, ou mesmo pesquisas e tecnologias que possam contribuir com políticas públicas, podem se beneficiar em ter áreas com profissionais de comunicação atuando estrategicamente com ações de longo prazo. A área de comunicação faz o papel de transbordamento do conhecimento da área de P&D para públicos que estão além da área científica e da área técnica, este último mais abordado pela área de transferência de tecnologia. Esse modelo exercido por uma área de comunicação para o Sistema ILPF pode ser aprimorado, adaptado e também estudado em termos de perfis de profissionais de comunicação e conhecimento necessário, modelos de atuação de profissionais de comunicação com atuação em C&T, estratégias de comunicação utilizadas, estudos sobre relacionamento com públicos de interesse e impacto dessas ações.

17.5 REFERÊNCIAS

BUENO, W. C. Comunicação empresarial e pesquisa agropecuária. In: DUARTE, J.; RIBEIRO, R. M. (ed.). **Comunicação em ciência e tecnologia: estudos da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

CASTELLS, M. A sociedade em rede: do conhecimento à política. In: CASTELLS, M.; CARDOSO, G. **A sociedade em rede: do conhecimento à acção política**. Belém: Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 2005. p. 17-30.

EMBRAPA. **Política de comunicação da Embrapa**. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/documentos-institucionais. Acesso em: 11 ago. 2025.

EMBRAPA. **Embrapa & Escola**. 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/embrapa-escola. Acesso em: 17 ago. 2025.

HJARVARD, S. Midiatização: teorizando a mídia como agente de mudança social e cultural. Matrizes, v. 5, n. 2, p. 53-91, 2012.DOI: http://doi.org/10. 11606/issn.1982-8160.v5i2p53-91.

JENKIS, H. **Cultura da conexão**: criando valor e significado por meio da mídia propagável. São Paulo: Aleph, 2014. 125 p.

KUNSCH, M. M. K. **Planejamento de relações públicas na comunicação integrada**. São Paulo: Grupo Editorial Summus, 2003.

MASSARANI, L.; DIAS, E. M. S. **José Reis**: reflexões sobre a divulgação científica. Rio de Janeiro: Fiocruz/COC, 2018. 236 p.

MORAIS, L. G.; DUARTE, J. A. M. Comunicação na Embrapa, uma revisão histórica. **Comunicação & Sociedade**, v. 47, p. e2025-e005, 2025. DOI: http://doi.org/10.15603/2175-7755/cs.v47.pe2025-002.

OLIVEIRA, M. J. Costa. **Comunicação pública**. Campinas, SP: Editora Alínea, 2004.

SAWYER, K.; SMITH, B. Communication and engagement for basic science: insights and practical considerations. **Journal of Clinical Outcomes Management**, v. 23, n. 7, p. Y01, 2024. DOI: http://doi.org/10.22323/2.23070401.

ZHU, W.; LIU, C.; FAN, S.; HE, Z. Avaliação de desempenho e fatores de influência da comunicação científica em instituições de pesquisa. **Sistemas**, v. 12, n. 6, p. 192, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/systems12060192.

Capítulo 18

Transferência de Tecnologia

José Alberto Bastos Portugal, Adilson Márcio Malagutti, Andreza Pereira da Silva Cruz, Martha Regina Lucizano Garcia, João Brunelli Júnior, Hélio de Sena Gouvea Omote, André Luiz Monteiro Novo, José Ricardo Macedo Pezzopane, Alberto Carlos de Campos Bernardi



RESUMO: A integração da ciência e tecnologia com o mercado e a sociedade precisa ser estabelecida numa relação de mão dupla, na qual mercado e sociedade deixam de ser simples demandantes por tecnologias, mas passam a fazer uma leitura crítica do impacto e dos benefícios que o produto da pesquisa e as soluções tecnológicas podem conferir para o avanço do agronegócio. Para acompanhar essas novas tendências é importante definir diferentes formas de participação no debate de temas nacionais de interesse técnico e científico, que estejam em pauta no mercado e na sociedade. Esses são desafios para a Transferência de Tecnologia (TT). A transição do desenvolvimento e disseminação de uma tecnologia específica para um modelo de cadeia produtiva promove a formação de redes de conhecimento. Essas redes exigem profissionais altamente qualificados com perspectivas abrangentes para operar com eficácia. Essa necessidade se estende a todos os participantes da cadeia e, consequentemente, exige abordagens mais sofisticadas e especializadas para a transferência de tecnologia. O fortalecimento das ações de Transferência de Tecnologia depende, entre outros fatores, um sólido alinhamento das agendas institucionais, maximizando o uso das informações técnicas e científicas, armazenadas na forma de tecnologias, processos, produtos e serviços (TPPS), bem como promovendo a valoração e a valorização do setor e de pessoas que atuam na TT. Dentro desta lógica, neste capítulo são apresentadas ações de transferência de tecnologia focadas em sistemas ILPF conduzidos pela Embrapa Pecuária Sudeste.

Palavras-chave: Tecnologias Agropecuárias; Agricultura Sustentável; Capacitação Técnica; Unidades de Referência Tecnológica; Redes de Conhecimento; Impacto Socioambiental.

ABSTRACT: The integration of science and technology with the market and society needs to be established in a two-way relationship, in which the market and society cease to be mere demanders of technologies, but begin

https://doi.org/10.4322/9786586819427-18

to critically analyze the impact and benefits that research output and technological solutions can provide for the advancement of agribusiness. To keep up with these new trends, it is necessary to establish different forms of participation in the debate on national technical and scientific topics on the market and/or societal agenda. These are challenges for Technology Transfer (TT). The shift from the generation and communication of a given technology to a production chain context encourages the formation of knowledge networks, which will need to be operated by increasingly qualified professionals with a broader vision. These needs apply to all actors in the chain and therefore require increasingly refined and professional technology-transfer actions. Strengthening technology transfer initiatives depends, among other factors, on solid interaction between institutional agendas, maximizing the use of technical and scientific information stored in the form of technologies, processes, products, and services (TPPS), as well as promoting the valuation and appreciation of the sector and the people working in technology transfer. Within this framework, this chapter will present technology transfer initiatives focused on integrated crop-livestock-forestry systems (ILPF) conducted by Embrapa Pecuária Sudeste.

Keywords: Agricultural Technologies; Sustainable Agriculture; Technical Training; Technological Reference Units; Knowledge Networks; Socio-Environmental Impact.

18.1 INTRODUÇÃO

A integração da ciência e tecnologia com o mercado e a sociedade precisa ser estabelecida numa relação de mão dupla, na qual mercado e sociedade deixam de ser simples demandantes por tecnologia, mas passam a fazer uma leitura crítica do impacto e dos benefícios que o produto da pesquisa e as soluções tecnológicas podem conferir para o avanço do agronegócio. A tendência de atuação integrada molda diferentes formas de participação no debate sobre temas de interesse técnico e científico em pauta no mercado e na sociedade. Esses são desafios para a Transferência de Tecnologia.

A geração, a transferência e a comunicação de uma determinada tecnologia em um contexto de cadeia produtiva, quando envolvem de forma integrada todos os seus atores, incitam a formação de redes de conhecimento que precisam ser operadas por profissionais qualificados e com uma visão mais abrangente. Isso se aplica a todos os atores da cadeia e, portanto, exige estratégias de Transferência de Tecnologia cada vez mais especializadas. O intercâmbio de conhecimento é um processo dialógico que adapta soluções tecnológicas a contextos específicos, permitindo a troca entre saberes tradicionais e conhecimentos científicos, facilitando a interpretação e a adaptação de tecnologia às realidades locais (Cordeiro et al., 2015).

O fortalecimento das ações de Transferência de Tecnologia depende, entre outros fatores, de uma articulação consistente entre as agendas institucionais, de modo a maximizar o uso das informações técnicas e científicas, consolidadas sob a forma de tecnologia, processos, produtos e serviços (TPPS). Esse movimento contribui para a valorização do trabalho de Transferência de Tecnologia e para o reconhecimento da importância dos profissionais que nela atuam. Inserida como componente essencial do processo de inovação, a Transferência de Tecnologia envolve a transposição do conhecimento produzido nos ambientes acadêmicos para a sua aplicação prática, cuja efetividade pode ser medida pela utilização concreta do conhecimento ou da tecnologia (Cordeiro et al., 2015).

Dessa maneira, a Transferência de Tecnologia, sendo efetiva e eficiente, poderá garantir o planejamento do desenvolvimento tecnológico numa perspectiva de longo prazo, sustentado pelo tripé tecnologia – inovação – difusão, de forma indissociável (Willcox, 2004; Souza, 2010). A Embrapa desempenha um papel importante nos processos de transferência de tecnologia para o agronegócio brasileiro e contribui para aumentar a produtividade, a sustentabilidade e a competitividade desse setor. A atuação da Embrapa vai além da geração de conhecimento, pois engloba a disseminação e a adoção efetiva de tecnologias, técnicas e processos agropecuários pelos produtores rurais e pelos demais elos da cadeia produtiva.

Para fortalecer esse processo, a Embrapa atua em parceria com outras instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs), redes de ATER, universidades e com o setor privado. A participação da Embrapa na Associação Rede ILPF, como representante técnico-científica, é um exemplo de interação público-privado. A Rede ILPF fomenta a adoção de sistemas integrados por produtores rurais, com o apoio de técnicos de assistência técnica e extensão rural, como parte de um esforço visando à intensificação sustentável da agricultura, silvicultura e da pecuária brasileiras.

Essa iniciativa tem alinhamento com as proposições do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC, Brasil, 2012, 2021), que prevê a expansão de áreas agropecuárias com sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) pelo Brasil. Esta tecnologia foi elencada no Plano ABC devido ao seu grande potencial para contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor agropecuário, sendo parte dos compromissos assumidos pelo país em fóruns internacionais e pelo estado de São Paulo.

A Embrapa Pecuária Sudeste tem um histórico consolidado de pesquisas em pecuária sustentável associada a sistemas ILPF. Essas pesquisas geram dados científicos robustos, que são devidamente analisados e convertidos em informações e conhecimentos passíveis de compartilhamento com produtores, técnicos e instituições parceiras, por meio dos processos de transferência de tecnologia, como os eventos técnicos e os programas de capacitação continuada.

18.2 ESTRATÉGIAS ADOTADAS PARA A TRANSFERÊNCIA DA TECNOLOGIA ILPF

A definição de estratégias para os processos de Transferência de Tecnologia é importante para assegurar a adoção adequada dos sistemas ILPF nas diferentes regiões do Brasil, pois os sistemas de produção são complexos e exigem adaptação das tecnologias de acordo com as características de cada propriedade. Isso inclui a definição de formas eficazes de disseminar o conhecimento entre os diversos atores envolvidos nos sistemas de produção, sobretudo técnicos e produtores rurais.

A Tabela 18.1 apresenta uma linha do tempo de ações realizadas pela Embrapa Pecuária Sudeste focadas em sistemas ILPF, demonstrando uma trajetória pela qual a informação científica e os ativos tecnológicos saem do universo da pesquisa e migram, passo a passo, para o setor produtivo. Pode-se observar que a estratégia de Transferência da Tecnologia ILPF adotada pela Embrapa Pecuária Sudeste foi estruturada em fases sequenciais, com alguma sobreposição, mas com abordagens específicas. A primeira iniciativa contou com a difusão generalizada dos conhecimentos produzidos pelas pesquisas, que foi sucedida pela estruturação de programas de capacitação continuada para técnicos de assistência técnica e de extensão rural, e seguiu até a etapa de implantação de Unidades de Referência Tecnológica (URTs).

Importante mencionar a participação da Embrapa Pecuária Sudeste, desde 2005, em redes de fomento e projetos colaborativos, como o Programa de Transferência de Tecnologia para a Integração Lavoura-Pecuária (PROTILP, 2004-2008), Integração Lavoura-Pecuária: uma proposta de produção sustentável para a região do Cerrado (PRODESILP), Dinâmica de gases de efeito estufa em sistemas de produção da agropecuária brasileira (Projeto Rede Pecus, 2011-2014) e os projetos apoiados pela Rede ILPF (2006 até os dias atuais). Esses são arranjos que contribuíram para potencializar e aperfeiçoar as ações de geração de informação e de difusão de conhecimento.

18.2.1 A fase de difusão e de comunicação da tecnologia ILPF

O impulso inicial para criar um ambiente de difusão da tecnologia deve se pautar na disseminação de informações. Um importante condicionante da adoção de tecnologia no setor agrícola é a formação da opinião pública, principalmente por parte de produtores rurais, e isso pode ser alcançado por meio de ações de comunicação em diferentes mídias, utilizando vídeos-pílulas e releases para imprensa especializada (Vinholis et al., 2021; Noce et al., 2024).

O planejamento das ações de Transferência de Tecnologia precisa estar embasado em pontos estratégicos que contribuam para a eficiência do alcance do processo. Destaca-se, por exemplo, definir:

1) A natureza da tecnologia (ativo tecnológico ou processo agropecuário), que deve estar alinhada com demandas concretas do setor produtivo.
2) O que se quer comunicar e como comunicar, que precisa estar ajustado para os diferentes perfis de público.
3) O tipo de evento, que pode ser moldado de acordo com a finalidade técnica, contribuindo também para definir o público-alvo a ser atendido. As principais modalidades de eventos são dias de campo, ciclo de palestras, visitas orientadas.

Para exemplificar, o estudo realizado por Vinholis et al. (2021) aponta que a assistência técnica prestada pela extensão rural, a participação em eventos técnicos de curta duração, como palestras e dias de campo, e a participação em reuniões das instituições agropecu-

Tabela 18.1. Linha do tempo de atividades desenvolvidas pela Embrapa Pecuária Sudeste.

Ano	Atividades desenvolvidas
2005	Estabelecimento do primeiro sistema ILP na Embrapa Pecuária Sudeste com reforma de pastagens para a terminação de novilhos. Curso de Capacitação em Integração Lavoura-Pecuária (15-18/ nov./2005, Marília-SP).
2006	Criação Comitê Estadual Integração Lavoura Pecuária do Estado de São Paulo (SEPDAG SFA).
2007	1º e 2º Dia de Campo de ILP (mar./2007 e jul./07). Publicação dos primeiros resultados da reforma de pastagem e da terminação de bovinos jovens em sistema de ILP em São Carlos-SP (Bernardi et al., 2007).
2008	3º Dia de Campo de ILP (dez./2008).
2009	Publicação dos resultados de 3 anos de avaliação do sistema de ILP em São Carlos-SP (Bernardi et al., 2009). Dia de Campo de ILPF (23/maio/2009). II Simpósio de ILP em Piracicaba (Bernardi et al., 2009).
2010	Lançamento da tecnologia ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste. Dia de campo de ILPF (28/ago./2010). Implantação de Unidades de Referência Tecnológica (URT) nos municípios de Olímpia-SP, Votuporanga-SP, Ibirá-SP, Brotas-SP, Aspásia-SP, Riolândia-SP e Carneirinho-MG.
2011	Início do monitoramento da tecnologia ILPF, segundo a metodologia de avaliação de impacto da Embrapa.
2012 e 2013	Acompanhamento técnico de URTs no ano de 2010.
2015	Curso de ILPF para Coopercitrus. Dias de campo para jornalistas especializados e para lideranças do agro (*ver* Capítulo 17).
2016	Dia de campo sobre ILPF. Módulos do programa de capacitação continuada em ILP/ILPF para técnicos da Coopercitrus, da Cocamar e da ABCZ.
2017	Dia de campo do ILPF em Bebedouro-SP. Rede de fomento ILPF da Embrapa Pecuária Sudeste. Capacitação continuada em ILP/ILPF – Módulos I, II, III, IV, São Carlos-SP. Dia de campo do ILPF em São Carlos-SP. Evento EcotendaSenac divulga ILPF. III Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo (01-02/dez./2017).
2018	Capacitação continuada: mentoria e prática sobre o componente animal e a pastagem no ILPF. Cooperação técnica com a Coopercitrus para a capacitação de técnicos em manejo de pastagens em ILPF. O sistema ILPF integrou o percurso das visitas mensais da unidade ao longo de todo o ano. IV Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo (13-14/dez./2018).
2019	V Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo (29-30/nov./2019).
2020	VI Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo, on-line (19-20/nov./2020).
2021	Curso para técnicos da Cocamar. Parceria com a Coopercitrus e Fazenda Santa Silvéria para implantação de Unidade de Referência Tecnológica (URT) em sistemas de ILPF na cidade de Piratininga-SP. VII Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo, on-line (15-16/set./2021).
2022	Início da cooperação técnica da Rede ILPF/Embrapa com a SAA/SP e CATI/SP (Integra SP Agro). Promoção da primeira capacitação on-line do projeto, envolvendo mais de 130 técnicos da CATI/SP.
2023	Projeto Integra SP Agro: participação de 60 técnicos apresentando projetos locais, com orientação de profissionais da Rede ILPF e da EMBRAPA; 15 projetos avaliados e direcionados para implementação; 7 encontros presenciais; 15 regionais da CATI e 14 pesquisadores da Embrapa envolvidos. Esta etapa continuou em 2024. Dia de campo "Pecuária de Precisão aplicada a sistemas integrados" (26/maio/2023). Etapa da Caravana ILPF em São Carlos-SP (21/set./2023). VIII Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo (07-08/dez./2023).
2024	Projeto Integra SP Agro: continuação das ações de acompanhamento da implementação de projetos pelos técnicos da CATI, com apoio e orientação de profissionais da Rede ILPF e da Embrapa. IX Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo (27-28/nov./2024).
2025	X Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo (04-05/dez./2025). Projeto Integra SP Agro: renovação da parceria Rede ILPF e SAA/SP, ampliando o escopo, incluindo a participação de técnicos da Fundação Instituto de Terras (Itesp), além dos técnicos da CATI/SP e novos parceiros.

árias formalmente organizadas, como cooperativas e sindicatos rurais, constituem os três canais de comunicação de maior importância para os adotantes da ILP.

De fato, a adoção de sistemas ILPF deve considerar as peculiaridades desses sistemas, que são dinâmicos, sem modelos prontos ou acabados e permitem estabelecer diferentes arranjos (ILP, IPF, ILPF, Agroflorestais), com capacidade de se adequar às características regionais e microrregionais, às condições edafoclimáticas, à estrutura das propriedades e aos propósitos desejados pelos produtores.

O crescente interesse por conhecer e implantar sistemas integrados está coerente com as tendências de aumento da conscientização para se investir na produção em bases sustentáveis, que valoriza a preservação ambiental e contribui para a mitigação de gases de efeito estufa (crédito de carbono). Isso se reflete ou é reflexo de programas e políticas públicas, como o Plano ABC+ (Brasil, 2021) e o Programa de PD&I em Recuperação de Pastagens Degradadas (Brasil, 2023).

Esse cenário reforça a relevância dos trabalhos realizados na Embrapa Pecuária Sudeste nesses 20 anos com os sistemas ILPF, o que aumenta a responsabilidade pela organização das ações de Transferência de Tecnologia. Ao longo desse período foram realizados diversos eventos para disseminar informações com base em resultados científicos, possibilitar a formação de opinião sobre a importância da tecnologia e desse processo agropecuário, e despertar a curiosidade, como base para se aprofundar no assunto. A multiplicidade de arranjos em torno dos sistemas ILPF também traz a possibilidade de estabelecer um ambiente técnico e científico interdisciplinar e interinstitucional, reunidos nos eventos promovidos pela Embrapa Pecuária Sudeste.

O que se observa é a possibilidade efetiva de contribuir para a formação prática de estudantes; de promover o intercâmbio de conhecimento científico e a ampliação das agendas de pesquisa e projetos; de qualificar e capacitar tecnicamente os profissionais da assistência técnica e da extensão rural, que atuam como catalisadores do processo produtivo; e de envolver os produtores rurais, potenciais adotantes dos sistemas ILPF.

Nesse contexto, destaca-se a ampliação das ações de Transferência de Tecnologia promovidas na Embrapa Pecuária Sudeste. Os eventos, realizados nas modalidades presencial e on-line, englobam diversas categorias, como dias de campo, simpósios, palestras, cursos, workshops e visitas técnicas (Figura 18.1). O reconhecimento crescente dos resultados da ILPF contribuiu para o aumento do número de eventos, especialmente das visitas técnicas entre 2016 e 2019, que foram interrompidas pela pandemia de covid-19 em 2020-2021 e retomadas a partir de 2022 (Figura 18.2).

18.2.2 A fase de capacitação continuada de técnicos

A capacitação continuada é um processo de atualização e ampliação de competências ao longo da carreira. Deve ser sistemática e focada na formação de multiplicadores (Cordeiro et al., 2015; Zimmer et al., 2019). A capacitação continuada de agentes multiplicadores, assim como a formação de redes institucionais sob a forma de parcerias com cooperativas, instituições públicas e empresas privadas, é fundamental para o sucesso da disseminação da tecnologia.

Desde 2015, a Embrapa Pecuária Sudeste dispõe de programa de capacitação continuada que treina profissionais, principalmente técnicos de assistência técnica e extensão rural, em sistemas de produção integrada, com atividades teóricas e práticas, incluindo a implantação de URTs pelos próprios técnicos, sob a supervisão da Embrapa. O programa de capacitação visa formar uma rede de multiplicadores que assumam um papel ativo na promoção de implantação de sistemas de integração em suas regiões, despertando o interesse do setor produtivo pelos sistemas ILPF, além de poderem ser pontos focais para validar tecnologia e fornecer um retorno para a pesquisa (Cordeiro et al., 2015).

Para incentivar o envolvimento de técnicos, foram firmadas parcerias para fomentar a tecnologia ILPF, por meio de um modelo de capacitação continuada, incluindo visitas técnicas periódicas às unidades demonstrativas. Dentro desse contexto, merecem destaque:

1) Programa de Capacitação Continuada em ILP/ILPF (2015, 2016 e 2018), totalizando oito módulos e 168 horas, com a participação de 30 técnicos da Cocamar Cooperativa Agroindustrial, Coopercitrus Cooperativa de Produtores Rurais, Associação Brasileira dos Criadores de Zebu (ABCZ), Diretoria de Assistência Técnica Integral (CATI) e técnicos da assistência técnica;
2) Capacitação em ILP/ILPF para 12 técnicos da Coopercitrus Cooperativa de Produtores Rurais (2019);



Fotos: Alberto Carlos de Campos Bernardi (C, D); Danilo Serra da Rocha (F); Gisele Rosso (E, G, H); Jorge Reti (A, B).

Figura 18.1. 1º e 2º Dia de Campo de ILP realizados em mar./2007 (A) e jul./2007 (B), 3º Dia de Campo de ILP realizado em dezembro/2008 (C e D), V Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo realizado em nov./2019 (E), Etapa da Caravana ILPF em São Carlos-SP realizada em set./2023 (F) e X Simpósio de ILPF do Estado de São Paulo realizado em dez./2025 (G e H).

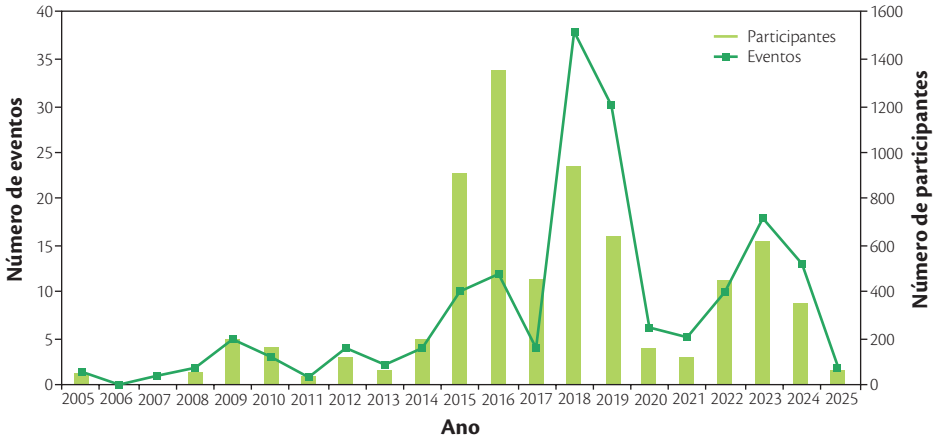


Figura 18.2. Número de participantes e de eventos relacionados à integração lavoura-pecuária-floresta realizados na Embrapa Pecuária Sudeste entre 2005 e 2025.

3) Capacitação de 30 técnicos da Cocamar Cooperativa Agroindustrial, na modalidade on-line (2020);
4) A partir de 2022, teve início o Projeto Integra SP Agro, que envolveu a capacitação continuada de técnicos da CATI e será apresentado no item 18.3 deste capítulo.

18.2.3 A estruturação de Unidades de Referência Tecnológica

As Unidades de Referência Tecnológica (URTs) consistem em sistemas de produção implantados nas propriedades rurais para gerar referenciais técnicos regionais e servir como "exemplo vivo" da tecnologia, considerando as condições de solo, clima e mercado locais. Elas constituem um espaço de reflexão, discussão e adaptação sobre o planejamento e o manejo dos sistemas de produção agropecuários. Assim, são fundamentais para a validação e demonstração de tecnologias, para incentivar a adoção de novas técnicas e processos, bem como para inspirar novas percepções por parte dos produtores e técnicos (Balbino et al., 2011a, 2011b; Cordeiro et al., 2015, 2020; Zimmer et al., 2019; Noce et al., 2024).

A implementação de uma URT deve seguir cinco etapas, que são o diagnóstico, o planejamento, a instalação, a condução e a avaliação, para estar apta às ações de Transferência de Tecnologia (Balbino et al., 2011a; 2011b). Cada etapa é interdependente, e é essencial que conte com a participação de parceiros locais.

Na Embrapa Pecuária Sudeste, as áreas experimentais também se configuram como URTs e foram instaladas pela primeira vez em 2005. Os sistemas são estruturados de acordo com as características e aptidões regionais, geográficas e edafoclimáticas, em diferentes combinações – ILP, ILPF e sistema silvipastoril (SSP). Para cada situação, é possível planejar o acompanhamento do desempenho dos componentes de cada sistema. Isso possibilita enriquecer as informações compartilhadas com técnicos, produtores e a sociedade.

Ao longo desse período, foram vivenciadas experiências importantes também com URTs instaladas em propriedades privadas, possibilitando ampliar e acelerar a difusão desse processo agropecuário. A Embrapa Pecuária Sudeste contribuiu com a implantação do projeto de sistema ILPF no Sítio Nelson Guerreiro (Brotas-SP), que visou à diversificação na forma de produção, com a introdução dos componentes de pecuária de corte, floresta (eucalipto) e lavoura, na comercialização de produtos e na geração de renda (Nicodemo et al., 2012, Guerreiro et al., 2013).

A URT da Fazenda Campina (Grupo CV – Carlos Viacava), em Caiuá-SP, foi instalada em 2013, num trabalho coordenado pela Embrapa Cerrados. A proposta era "aumentar a viabilidade da atividade pecuária, na busca de redução de custos", mas com o desafio de conduzir o projeto em região de solos arenosos, típicos da região Oeste de São Paulo, além de condições climáticas também desafiadoras (Cordeiro et al., 2020). A Embrapa Pecuária Sudeste participou do projeto, sobretudo nas ações de difusão da tecnologia ILPF.

Entre 2016 e 2017, a parceria da Embrapa Pecuária Sudeste e da Coopercitrus Cooperativa de Produtores Rurais visou à implantação da URT ILP/ILPF na Estação Experimental da Cooperativa, situada em Bebedouro-SP, com modelos de integração lavoura-pecuária (ILP) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF), configurando um importante espaço para disseminação da tecnologia.

A URT para Transferência de Tecnologia em sistemas integrados de pecuária de corte na região Centro-Oeste do estado de São Paulo foi implantada na Fazenda Santa Silvéria, em Piratininga-SP, por meio de uma cooperação técnica entre a Embrapa Pecuária Sudeste e a Cooperativa Agrícola Coopercitrus. Entre 2021 e 2024 foram desenvolvidos trabalhos relacionados ao manejo do pastejo e à avaliação do consórcio do feijão Guandu BRS Mandarim com gramíneas forrageiras.

18.3 PROJETO INTEGRA SP AGRO

A experiência acumulada nas diferentes estratégias de transferência da tecnologia ILPF proporcionou a ideação da estrutura e da organização das etapas do Projeto Integra SP Agro em 2022. Esse projeto é resultado da parceria entre a Associação Rede ILPF, com a participação técnica da Embrapa, e a Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAA/SP), representada pela Diretoria de Assistência Técnica Integral (CATI). O objetivo é intensificar a disseminação da tecnologia ILPF no estado de São Paulo, tendo os técnicos da CATI como catalisadores dessa ação. Em 2025, com a renovação do Acordo de Cooperação Técnica entre a Rede ILPF e a SAA/SP, a Fundação Instituto de Terras (Itesp) também passa a compor o projeto Integra SP Agro, ampliando o grupo de técnicos extensionistas que serão treinados e acompanhados.

A participação de técnicos da extensão rural tem sido determinante para assegurar a capilaridade necessária no processo de difusão da tecnologia, de forma assistida, desde a elaboração de projetos até a implantação dos sistemas ILPF, nas suas diferentes combinações, de acordo com o perfil das propriedades e da região em que estão inseridas (Figura 18.3).

Para tanto, o aprimoramento do conhecimento, por meio do intercâmbio de dados, informações e experiências sobre o tema ILPF, é imprescindível. A Rede ILPF, a Embrapa Pecuária Sudeste (representando a Embrapa) e a Coordenação Geral da CATI organizam, em conjunto, a agenda de trabalhos de treinamento e de acompanhamento dos técnicos, seguindo um planejamento previamente estabelecido e se configurando num arranjo que promove a integração entre pesquisa, extensão e produção agropecuária.

As competências técnicas já presentes no corpo de técnicos da CATI foram mapeadas para que esses profissionais atuassem como motivadores entre os seus pares, amplificando a capacidade de dissemi-

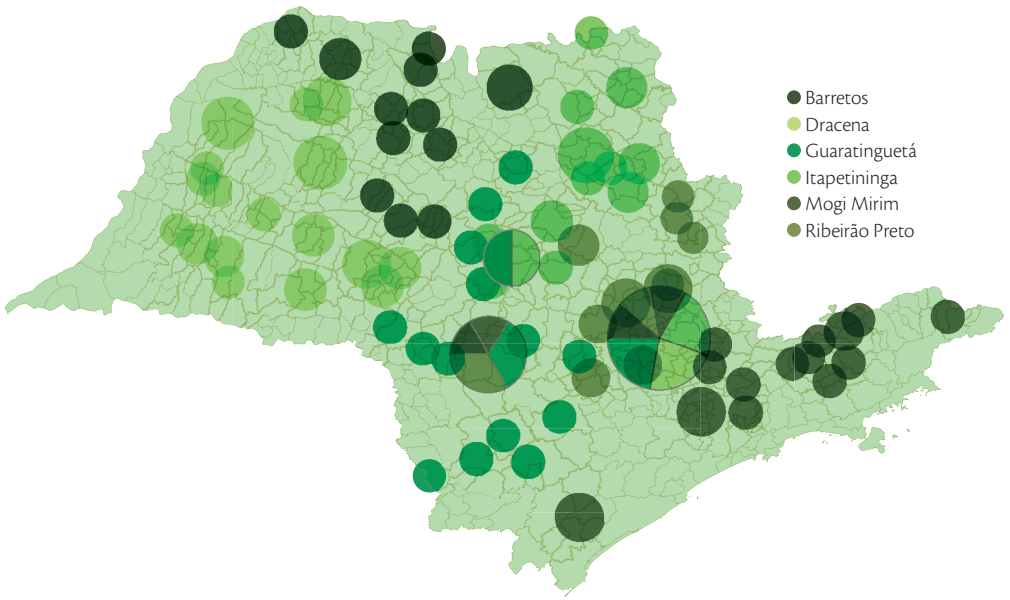


Figura 18.3. Regiões do estado de São Paulo que os técnicos que participaram do treinamento EaD atendem.
Elaborado por Rede ILPF.

nação dos conhecimentos técnicos compartilhados pela equipe de pesquisadores da Embrapa nos treinamentos teóricos e de vivência prática.

Foi estabelecido um conjunto de ações educativas, na forma de um programa integrado e continuado de capacitação em ILPF, na modalidade mista (educação a distância e presencial), possibilitando o mapeamento de técnicos engajados e produtores inovadores para a difusão dessa tecnologia.

Isto permitiu avançar para a fase seguinte de seleção das propostas de projetos-piloto para implantação e ou adaptação de sistemas de produção para os modelos de ILPF, num processo conduzido pelos técnicos da CATI, com o apoio e a orientação das equipes da Rede ILPF e da Embrapa. A intensificação da qualificação técnica contribuiu para que os técnicos pudessem perceber as diversidades dos sistemas de produção e as potencialidades locais e regionais, de forma a adaptar os projetos-piloto, focando na conversão dos sistemas produtivos em sistemas mais sustentáveis, sob os aspectos econômicos, ambientais e sociais, fortalecendo a adoção de práticas sustentáveis (Figuras 18.4 e 18.5).

No estado de São Paulo, essa iniciativa ganhou relevância diante do diagnóstico obtido do Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária (São Paulo, 2017), que apurou 6,5 milhões de hectares ocupados por pastagens (39,3% das terras cultiváveis do estado), dos quais aproximadamente 1,3 milhão de hectares (20%) de pastagens em estágio avançado de degradação, e cerca de 3,9 milhões de hectares (60%) em estágio inicial de degradação. Soma-se a isso o fato que a adoção de sistema ILPF no estado de São Paulo é de pouco mais de 800 mil ha (Cordeiro et al., 2020). Esse cenário exigiu soluções que restaurassem a capacidade produtiva, aumentem a resiliência climática e melhorem a rentabilidade das propriedades.

O Projeto Integra SP Agro atua diretamente sobre esses desafios, considerando que os incentivos para a adoção de sistemas ILPF se apresentam como alternativa viável e comprovada para cumprir esse papel de ser uma tecnologia que possibilita promover a recuperação de áreas degradadas e melhorar a fertilidade dos solos, aumentar a oferta de alimento para os animais na estação seca, reduzir custos de produção e

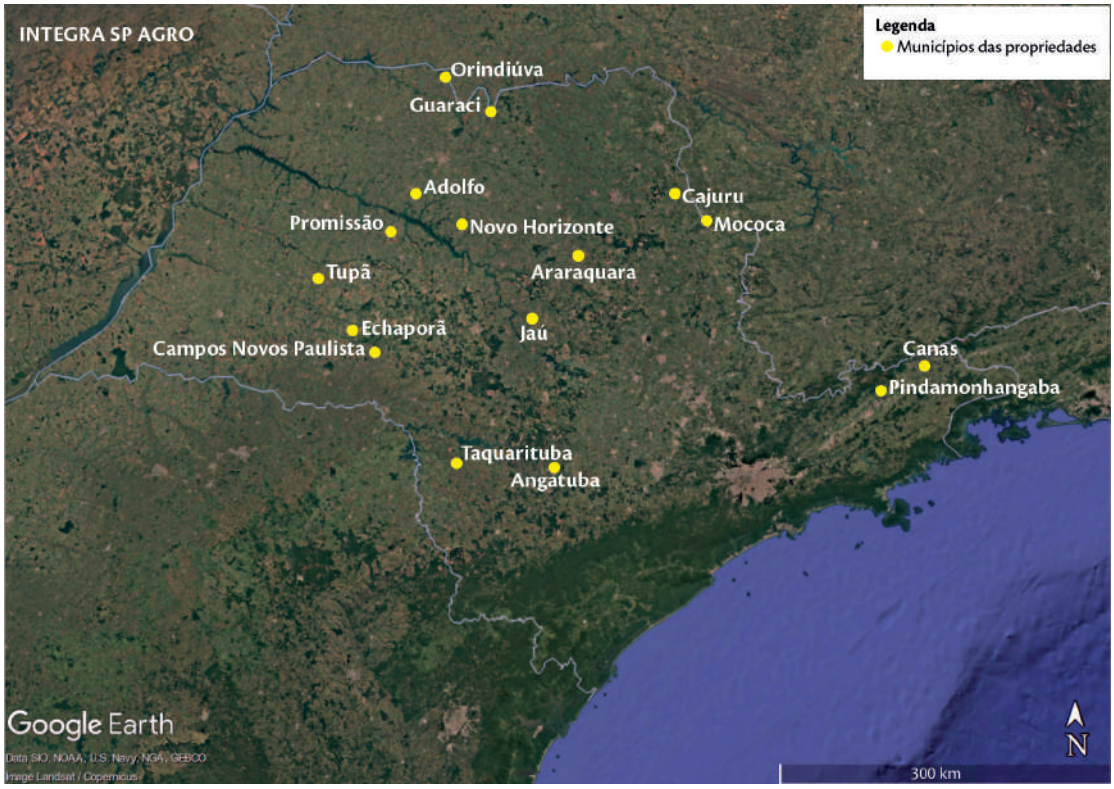


Figura 18.4. Distribuição geográfica das propriedades monitoradas pelo Programa Integra SP Agro.
Elaborado por Rede ILPF.

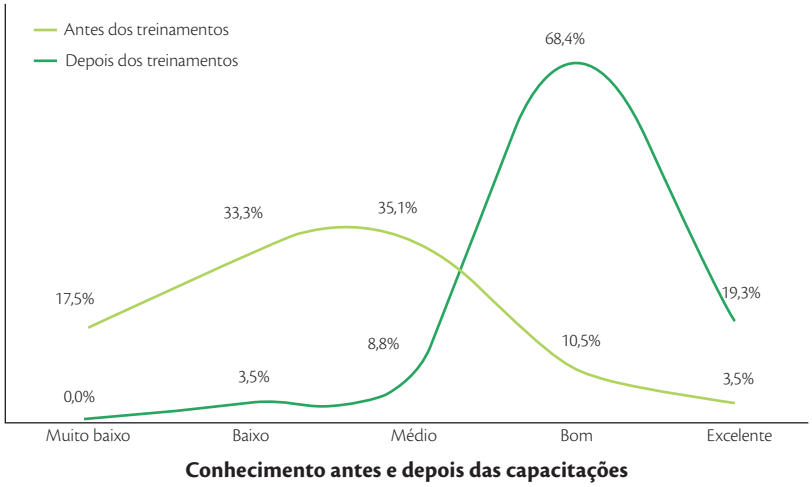


Figura 18.5. Percepção do nível de conhecimento dos técnicos no início do programa em 2022 e após rodada de treinamentos presenciais em 2024.

Elaborado por Rede ILPF.

elevar a rentabilidade, intensificando o uso da terra e gerando benefícios ambientais e econômicos. E isso num formato que combina capacitação continuada; implantação e acompanhamento de URTs; monitoramento por meio de indicadores técnicos, econômicos e sociais; e eventos de demonstração e articulação institucional, contribuindo para facilitar o acesso às tecnologias e às linhas de crédito específicas para ILPF (Figura 18.6).

18.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DA TECNOLOGIA ILPF

A Embrapa adota a metodologia Ambitec-Agro para a avaliação dos impactos socioambientais e econômicos das tecnologias (Rodrigues, 2015). Nessa abordagem, as percepções dos produtores que adotam a tecnologia são transformadas em indicadores de impacto social e ambiental. Já a dimensão econômica da avaliação contempla tanto os recursos financeiros utilizados na geração e na transferência da tecnologia, quanto os benefícios decorrentes de sua adoção pelo setor produtivo.

Na dimensão social do Ambitec-Agro são avaliados os impactos sobre o emprego, a renda e a gestão (Figura 18.7). Os resultados apontaram aumento da produtividade e maior diversidade de produtos produzidos. O aumento na renda das propriedades rurais foi percebido pelos adotantes da tecnologia, enquanto as mudanças no sistema de produção demandam capacitação técnica, dedicação adicional de tempo e maior engajamento familiar. Os produtores entrevistados destacaram que a integração dos sistemas de produção exige planejamento criterioso e gestão eficiente das atividades. Além disso, a assistência técnica foi considerada essencial para a adoção bem-sucedida da tecnologia. Na dimensão social da tecnologia ILPF, é destaque a geração de aproximadamente 16 mil empregos diretos, entre 2010 e 2024.

Na dimensão ambiental do Ambitec-Agro, avaliam-se os impactos sobre o bem-estar e a saúde do animal, a qualidade do produto e a eficiência tecnológica (Figura 18.8). Entre os critérios analisados, o bem-estar dos animais e a qualidade do solo foram destacados pelos produtores adotantes da ILPF como aspectos de grande impacto positivo. Por outro lado, houve aumento no consumo de água e de insumos agrícolas, assim como na utilização de atividades mecanizadas, o que são características negativas da tecnologia, sob a ótica ambiental. Entretanto, houve consenso de que a integração dos sistemas contribui para maior produtividade e para o uso mais eficiente dos insumos.

A percepção dos adotantes em relação ao bem-estar e à saúde animal, bem como à qualidade do produto, apresentou melhorias significativas ao longo do período estudado. Esse resultado pode estar associado à incorporação gradual de conhecimentos, decorrentes tanto de novas pesquisas quanto do desenvolvimento de experiências locais, construídas a partir da interação entre técnicos e produtores.

A série histórica do fluxo de benefícios e custos da tecnologia ILPF na Embrapa Pecuária Sudeste, atuali-



Fotos: Rodrigo di Carlo.

Figura 18.6. Projeto Integra SP Agro - Eventos realizados em diferentes regiões do Estado, com o propósito de avaliar o potencial da região para a implementação da integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): Avaré (A), Jaú (B), Ribeirão Preto (C), São João da Boa Vista (D), Assis (E) e São José do Rio Preto, com propósito de avaliar o potencial da região para a implementação da ILPF.

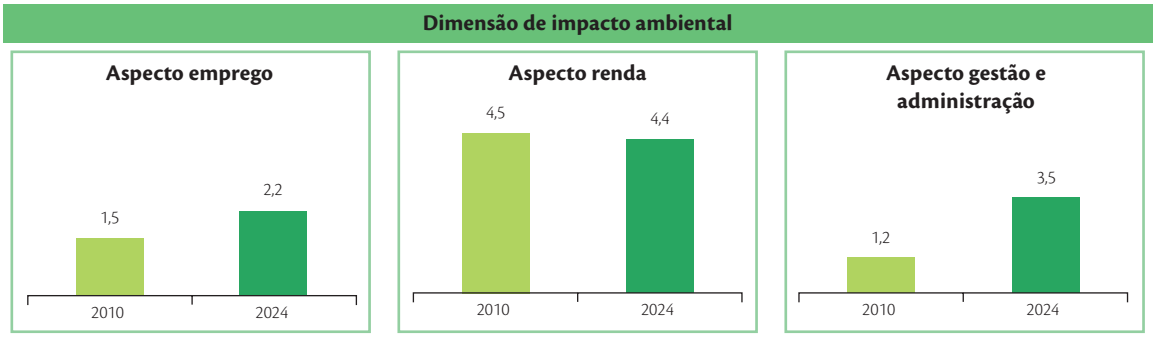


Figura 18.7. Evolução dos indicadores de impacto social.
Elaborado por Adilson Malagutti.

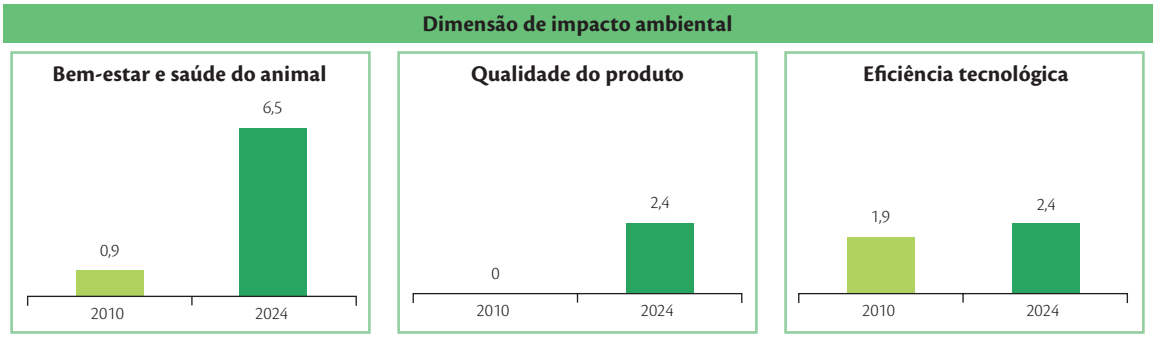


Figura 18.8. Evolução dos indicadores de impacto ambiental.
Elaborado por Adilson Malagutti.

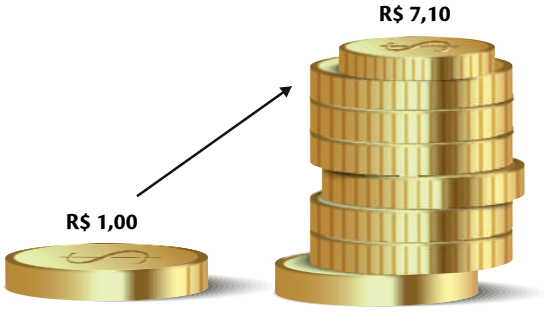


Figura 18.9. Os benefícios para a sociedade superam os custos da tecnologia do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).
Elaborado por Adilson Malagutti.

zada até 2024, com valores corrigidos pelo IGP-DI de outubro de 2024, indicou uma relação benefício-custo descontada a 6% ao ano de 7,1. Esse indicador mostra que a tecnologia ILPF retornou R$ 7,10 em benefícios para a sociedade, para cada R$ 1,00 investido na sua geração e transferência (Figura 18.9).

O cálculo do valor presente líquido (VPL), que mede se os benefícios futuros de um investimento superam os custos iniciais, descontado a uma taxa de 6% ao ano, resultou em R$ 578.139.458,67, valor que indica que os benefícios proporcionados pela ILPF cobriram os investimentos realizados na geração e transferência da tecnologia e retornaram um excedente para a sociedade.

A taxa interna de retorno (TIR) da tecnologia, considerando a série histórica até 2024, foi estimada em 72%. Esse impacto incorpora a expansão da produção em novas áreas, expressa pela renda adicional gerada nos sistemas integrados, que agregam a produção e a renda da agricultura àquelas obtidas anteriormente apenas com a pecuária convencional. De forma geral, os resultados evidenciam que a adoção de sistemas ILPF gera impactos positivos, com benefícios tanto para o ambiente quanto para a sociedade.

18.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho de Transferência de Tecnologia é crucial para consolidar a ILPF como uma estratégia de intensificação agropecuária sustentável, que concilia a produção de alimentos, fibras e energia com a preservação ambiental.

Os benefícios ambientais da ILPF, como a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE), a melhoria da fertilidade do solo, a conservação da água e a promoção do bem-estar animal, foram evidenciados nas pesquisas e nas ações de Transferência de Tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste e seus parceiros. Esses benefícios reforçam o compromisso da Embrapa com o desenvolvimento de soluções para uma agricultura e pecuária de baixo carbono.

O Integra SP Agro é um modelo de Transferência de Tecnologia baseado em parcerias, que transforma resultados de pesquisa em práticas produtivas sustentáveis e replicáveis. O programa tem impacto direto na capacitação técnica, na adoção de ILPF e na recuperação de áreas degradadas no estado de São Paulo e contribui para as metas nacionais da Rede ILPF.

A Embrapa Pecuária Sudeste tem feito contribuições significativas para o avanço da ILPF no Brasil, especialmente no estado de São Paulo, que apresenta um grande potencial para a adoção desses sistemas, sobretudo em áreas de pastagens pouco produtivas. Contudo, a Transferência de Tecnologia em ILPF ainda enfrenta desafios, como a necessidade de adaptar os sistemas a diferentes escalas de produção e a conscientização dos produtores sobre os benefícios a longo prazo.

As ações futuras para ampliação da adoção de sistema ILPF deverão focar na expansão de políticas públicas que incentivem, por exemplo, o acesso ao crédito rural e à assistência técnica, no fortalecimento de redes de cooperação para compartilhamento de conhecimento e ainda no uso de tecnologia digitais (como agricultura e pecuária de precisão) para otimizar os sistemas integrados.

18.6 REFERÊNCIAS

BALBINO, L. C.; MARTINEZ, G. B.; GALERANI, P. R. (ed.). **Ações de transferência de tecnologia de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta 2007-2011**. Brasília, DF: Embrapa, 2011a. 38 p.

BALBINO, L. C.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; KICHEL, A. N.; ROSINHA, R. O.; COSTA, J. A. A. **Manual orientador para implantação de unidades de referência tecnológica de integração lavoura-pecuária-floresta URT iLPF**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2011b. 48 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 303).

BERNARDI, A. C. de C.; VINHOLIS, M. de M. B.; BARBOSA, P. F.; ESTEVES, S. N. **Reforma de pastagem e terminação de bovinos jovens em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos, SP**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 9 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Comunicado técnico, 83).

BERNARDI, A. C. de C.; ESTEVES, S. N.; BARBOSA, P. F.; VINHOLIS, M. de M. B. **Renovação de pastagem e terminação de bovinos em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos, SP**: resultados de 3 anos de avaliações. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009. 28 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 24).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/download.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030**: plano Operacional. Brasília: Mapa/DEPROS, 2021. 133 p.

BRASIL. Decreto nº 11.815, de 5 de dezembro de 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis e o seu Comitê Gestor Interministerial. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 161, n. 231, p. 18, 6 dez. 2023.

CORDEIRO, L. A. M.; BALBINO, L. C.; GALERANI, P. R.; DOMIT, L. A.; SILVA, P. C.; KLUTHCOUSKI, J.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SKORUPA, L. A.; WRUCK, F. J. Transferência de tecnologia para adoção da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta:** o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 377-393. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

CORDEIRO, L. A. M.; KLUTHCOUSKI, J.; SILVA, J. R.; ROJAS, D. C.; OMOTE, H. S. G.; MORO, E.; SILVA, P. C. G.; TIRITAN, C. S.; LONGEN, A. **Integração Lavoura-Pecuária em solos arenosos**: estudo de caso da Fazenda Campina no Oeste Paulista. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2020. 127 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 357).

GUERREIRO, M. F.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, C. E. S.; BORGES, W. L. B. **Introdução de árvores em sistemas de produção agrícola no bioma Mata Atlântica na região sudeste**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2013. 52 p.

NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, C. E. S.; CARPANEZZI, A. A.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; VINHOLIS, M. M. B.; BORGES, W. L. B.; SANTOS JUNIOR, H. A.; TOKUDA, F.; PELISSON, G. J. B.; GUERREIRO, M. F.; MARTINES, L.; BOTELHO, A. A.; RODRIGUEZ, L. L.; SILVA, G. S.; FREITAS, R. S.; MORAIS, L. G. **Adequação ambiental e sistemas silvipastoris em propriedades rurais pecuárias do Estado de São Paulo**: relatório de atividades. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2012. 46 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 107).

NOCE, M. A.; CHAVES, F. F.; PESSOA, S. T.; DE OLIVEIRA, I. R. Ações de transferência de tecnologia em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. In: ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; SANTANA, D. P.; SILVEIRA, M. C. T.; BORGHI, E. (ed.). **Quinze anos de integração lavoura-pecuária e dez anos de integração lavoura-pecuária-floresta na Embrapa Milho e Sorgo**. Brasília, DF: Embrapa, 2024. p. 299-314.

RODRIGUES, G. S. **Avaliação de impactos socioambientais de tecnologia na Embrapa**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2015. 41 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 99).

SÃO PAULO. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Instituto de Economia Agrícola. Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável. **Projeto LUPA 2017**: Censo Agropecuário do Estado de São Paulo. São Paulo: SAA; IEA; CDRS, 2017. Disponível em: https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/. Acesso em: 23 set. 2025.

SOUZA, A. F. **Marco regulatório do processo de transferência de tecnologia**. Web Artigos, 2010. Disponível em: https://www.webartigos.com/artigos/marco-regulatorio-do-processo-de-transferencia-de-tecnologia/53157. Acesso em: 8 out 2025.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; CARRER, M. J.; BARIONI JÚNIOR, W.; BERNARDO, R. Perfil dos adotantes de sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta do Centro-Oeste do estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v. 51, eie102020, p. 1-16, 2021. Disponível em https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1133801/1/PERFIL-ADOTANTES-SISTEMAS.pdf. Acesso em: 8 out. 2025.

WILLCOX, L. C. B. Avaliação do desenvolvimento tecnológico e transferência de tecnologia: o caso Instituto Oswaldo Cruz –

Fundação Oswaldo Cruz. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**, v. 9, n. 2, p. 389-398, 2004.

ZIMMER, A. H.; SALTON, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; SANTAROSA, E.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA, A. R.; BUNGENSTAB, D. J.; OMOTE, H. S. G.; DEBIASI, H.; SOUZA FILHO, H. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; VINHOLIS, M. M. B.; CARRER, M. J.; GUERREIRO, M. F. Sistemas ILPF e transferência de tecnologia nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil**: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impacto. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 234-280.

Capítulo 19

Indicadores Econômicos, Ambientais e Sociais para Diagnóstico e Monitoramento de Sistemas Integrados

Marcela de Mello Brandão Vinholis, Estella Rosseto Janusckiewicz, Sandra Aparecida Santos, Emerson Borghi, Carlos Henrique de Paula e Silva, Amanda Hernandes, Andreza Pereira da Silva Cruz



RESUMO: Este capítulo apresenta a aplicação de sete indicadores econômicos, ambientais e sociais para monitorar o desempenho e facilitar a gestão de sistemas integrados de produção agropecuária. Duas propriedades foram utilizadas no estudo de caso: uma com dois anos de sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e outra com três anos de lavoura-pecuária-floresta (ILPF). A Relação Equivalente do Uso da Terra (LER) mede a eficiência no uso da terra e indicou que os sistemas integrados apresentaram maior produtividade do que o sistema exclusivo, em uma área do mesmo tamanho. A Margem Bruta (MB) indicou aumento com o decorrer dos anos de implantação dos sistemas integrados, principalmente quando se considerou o estoque de bovinos e de madeira em pé. O Balanço de Nitrogênio (BN) no sistema ILPF foi negativo no primeiro ano e positivo nos demais anos. O BN foi positivo no sistema ILP. O indicador de Multifuncionalidade (MULTI) mostrou que o aumento de serviços ecossistêmicos está relacionado com o acréscimo de serviços de provisão e com a melhora nos resultados dos serviços de regulação e suporte. Os indicadores avaliados a partir da percepção do produtor facilitaram identificar os fatores positivos e os de melhoria em relação ao bem-estar animal (BEA), ao trabalho nos sistemas integrados (PST) e aos riscos associados aos sistemas integrados (PR). Os resultados mostram que o conjunto de indicadores econômicos, ambientais e sociais é uma ferramenta útil para monitorar a sustentabilidade dos sistemas integrados ao longo dos anos e indicam os aspectos que devem ser modificados ou melhorados, considerando o desenho de cada sistema.
Palavras-chave: Balanço de Nitrogênio; Bem-estar Animal; Margem Bruta; Multifuncionalidade; Relação Equivalente do Uso da Terra.

ABSTRACT: This chapter presents the application of seven economic, environmental, and social indicators to monitor the performance and facilitate the management of integrated crop-livestock production systems. Two

https://doi.org/10.4322/9786586819427-19

properties were used in the case study: one with 2 years of an integrated crop-livestock (ICLS) system and another with 3 years of an integrated crop-livestock-forestry (ICLF) system. The Equivalent Land Use Ratio (ELR) measures land-use efficiency and indicates that integrated systems show higher productivity than the exclusive system in an area of the same size. The Gross Margin (GM) increased over the years of implementing the integrated systems, particularly for cattle inventory and standing timber. The Nitrogen Balance (NB) in the ICLF system was negative in the first year and positive in the following years. The NB was positive in the ICLS system. The Multifunctionality indicator (MULTI) showed that increases in ecosystem services are associated with increases in provisioning services and improvements in the outcomes of regulation and support services. The indicators evaluated from the producer's perspective facilitated the identification of positive factors and areas for improvement related to animal welfare (AW), work in integrated systems (WIS), and risks associated with integrated systems (RS). The results show that the set of economic, environmental, and social indicators is a helpful tool for monitoring the sustainability of integrated systems over time and identifies aspects that should be modified or improved, taking into account the design of each system.
Keywords: Nitrogen Balance; Animal Welfare; Gross Margin; Multifunctionality; Land Use Equivalent Ratio.

19.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de indicadores são instrumentos eficientes e adequados para a avaliação, a quantificação e o monitoramento de um determinado fenômeno, constituindo um dos meios de comunicação e de construção de princípios e de diretrizes em seu processo de transformação (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2003; Freudenberg, 2003). Sanches (2004) define indicador como sendo um dado relativo a uma variável significativa que caracteriza um fenômeno e que serve de indicação para que se possa atuar sobre tal fenômeno.

Neste capítulo, é apresentado um conjunto de indicadores econômicos, ambientais e sociais e sua aplicação em dois casos reais de sistemas de integração: (i) lavoura-pecuária-floresta, e (ii) lavoura-pecuária. A metodologia deste conjunto de indicadores é descrita em Vinholis et al. (2025). Os sistemas integrados consistem em estratégia de produção sustentável que combina pelo menos duas modalidades das atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação (Balbino et al., 2011), de forma planejada, sistematizada e continuada, com a finalidade de auferir produtos e serviços para a comercialização (Vinholis et al., 2020).

Os indicadores aplicados neste capítulo têm por objetivo acompanhar e mensurar o desempenho ao longo do tempo de sistemas de integração. Esses indicadores auxiliam tanto técnicos como produtores rurais na gestão dos recursos, na identificação de gargalos e na mensuração dos efeitos da adoção dos sistemas integrados nas dimensões econômica, ambiental e social. Esta ferramenta gera informações úteis para apoiar as decisões dos produtores rurais, a difusão da tecnologia e a formulação e adequação de políticas públicas voltadas para o fomento de práticas sustentáveis.

19.2 INDICADORES DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

19.2.1 Seleção de indicadores em sistemas de integração

A seleção dos indicadores econômicos, ambientais e sociais (Tabela 19.1) para acompanhamento de propriedades que utilizam sistemas ILPF foi realizada por uma equipe multidisciplinar composta por pesquisadores e especialistas nas áreas de sistemas integrados, conservação de solo, socioeconomia e extensão rural. Esta equipe é resultante da parceria entre Embrapa, Rede ILPF e Diretoria de Assistência Técnica Integral do estado de São Paulo (CATI). A seleção e a definição dos indicadores basearam-se na expertise dos especialistas e em documentos e artigos técnico-científicos relacionados ao tema de cada indicador. Considerou-se a coleta de dados e a avaliação anual dos indicadores. O detalhamento do cálculo de cada um dos indicadores, a definição e as referências utilizadas encontram-se em Vinholis et al. (2025). Adicionalmente, elaborou-se uma planilha Excel para a aplicação dos indicadores.

A relação equivalente do uso da terra (LER) é um indicador utilizado para avaliar a produtividade dos sistemas ILPF em relação à produtividade de monoculturas (baseado em Deb; Dutta, 2022; Mead; Willey, 1980). Os cálculos consideram a produção por área de terra de cada componente do sistema de produção e

Tabela 19.1. Indicadores ambientais, econômicos e sociais para acompanhamento de sistemas integrados.

Indicador	Descrição resumida	Sigla
Relação equivalente do uso da terra	Produção por área no sistema integrado em relação à produção por área no sistema de monocultivo	LER
Margem bruta	Diferença entre a receita e os custos operacionais do sistema integrado	MB
Balanço de nitrogênio	Diferença entre entrada e saída de nitrogênio no sistema integrado	BN
Multifuncionalidade	Diversidade de funções ecossistêmicas no sistema integrado	MULTI
Bem-estar animal	Avaliação de aspectos relacionados às cinco liberdades do bem-estar animal	BEA
Percepção social do trabalho	Avaliação de aspectos relacionados ao trabalho e conhecimento	PST
Percepção de riscos	Avaliação de aspectos relacionados à renda e riscos de produção	PR

Fonte: Vinholis et al. (2025).

o tempo de ocupação da área, no sistema integrado e no monocultivo.

O indicador de Margem Bruta (MB) é a diferença entre a receita e os custos (baseado em Godoy (2020) e Matsunaga et al. (1976)). Dessa forma, a receita é composta pelos produtos vendidos (sacas de milho, cabeças de gado, m^3 de madeira, etc.), e os custos são compostos pelos custos com mão de obra volante/serviços terceirizados, defensivos, adubos, suplementação, etc., de cada componente do sistema integrado, adicionado das despesas gerais com administração. Na produção pecuária e arbórea há um estoque de produtos não comercializados dentro do ano, assim, para complementar a análise econômica, também é estimada a MB adicionada do estoque de bovinos e da madeira em pé.

O Balanço de Nitrogênio (BN) é calculado de acordo com Godinot et al. (2014). O BN reflete a diferença entre a entrada e a saída de N do sistema integrado no ano avaliado. A entrada de N no sistema ILPF é a somatória do N fornecido por meio de fertilizantes, da fixação biológica de nitrogênio, da suplementação alimentar e do peso de entrada dos bovinos; e a saída é a somatória de N extraído pela produção de cada componente. Para complementar a análise, é mensurado o BN adicionado do estoque de animais e de madeira em pé que segue no sistema do ano avaliado para o ano seguinte.

A mensuração da multifuncionalidade (MULTI) dos sistemas integrados avalia os serviços ambientais baseados em Augstburger et al. (2018) e os cálculos em Sturck e Verburg (2017) e Manning et al. (2018). Foram considerados os serviços ambientais de provisão (produção) e os de regulação e suporte (estabelecimento da cultura/pastagem, estresse da pastagem durante a seca, suscetibilidade do solo à erosão, alagamento de superfície, cobertura viva da área com plantas anuais, cobertura viva da área pastagens, teor de matéria orgânica do solo, distribuição de excretas nas pastagens, presença de serrapilheira, presença de macrofauna do solo).

Os indicadores sobre o Bem-Estar Animal (BEA), a Percepção Social do Trabalho (PST) e a Percepção de Riscos (PR) nos sistemas integrados são adaptados da metodologia proposta por Oliveira et al. (2019). Os dados de entrada são perguntas de percepção do produtor para cada variável que compõe o indicador, a serem respondidas em uma escala de cinco pontos. O BEA considera as cinco liberdades do animal: livre de sede, fome e desnutrição; livre de desconforto e exposição; livre de dor, ferimentos e doenças; livre do medo e da angústia; e livre para expressar comportamento normal (Mellor, 2016). A PST considera o número de postos de trabalho, a necessidade de qualificação e habilidades dos colaboradores, o estímulo do produtor a buscar novas informações e a aprender, a jornada de trabalho (tempo dedicado) do produtor e/ou da minha família na propriedade, o ritmo de trabalho (esforço físico e mental) e a rede de relacionamento profissional do produtor com a utilização de sistemas ILPF. A PR considera a influência do sistema integrado na renda do produtor, a resiliência às variações climáticas e à ocorrência de pragas e/ou doenças, bem como a utilização de insumos externos.

19.2.2 Aplicação dos indicadores em sistemas de integração

Duas propriedades foram utilizadas no estudo de caso, uma com sistema de integração lavoura-pecu-

ária (ILP) e outra com lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Os dados para o cálculo e avaliação dos indicadores referem-se ao ano agrícola (setembro a agosto).

19.2.2.1 Sistema ILP

A propriedade com sistema ILP é localizada no estado de São Paulo e possui uma área produtiva de 550 ha, com 65 ha de sistemas integrados no primeiro ano e 81 ha no segundo ano. Dois anos agrícolas foram avaliados, conforme as atividades descritas na Figura 19.1.

No ano agrícola de 2022/2023 (primeiro ano), o sistema ILP foi implantado em uma área de pastagem degradada (35 ha – talhão 1). Em setembro/2022, o solo foi preparado e corrigido com calagem (2,5 ton/ha PRNT 70) e gessagem (1,0 ton/ha), seguindo recomendação de análise de solo; em outubro/2022, foi realizado o plantio da cultivar de soja BRASMAX FIBRA IPRO de ciclo tardio (240 mil sementes/ha e 250 kg/ha 08-30-20); os tratos culturais durante o ciclo da soja ocorreram conforme padrão da região; em fevereiro/2023, foi realizada a colheita da soja (produtividade de 66 sc/ha); em março/2023, foi realizado plantio da pastagem *Urochloa ruziziensis* (10 kg/ha a lanço); em maio/2023, iniciou-se o pastejo de inverno com taxa de lotação média de 1,55 UA/ha até início de outubro/2023 (130 dias de pastejo); após a retirada dos animais, o pasto permaneceu em rebrota por 15 dias, sendo então realizada a dessecação da pastagem para plantio direto da nova safra.

No ano agrícola de 2023/2024 (segundo ano), foi novamente implantada a soja no talhão 1 (35 ha) e iniciado o sistema ILP em um novo talhão com 16 ha (talhão 3). Em ambas as áreas, em outubro/2023, o solo foi corrigido em superfície com calagem e gessagem (1,0 ton/ha 2:1), seguindo recomendação de análise de solo; em novembro/2023, 30 dias após a retirada dos animais e 15 dias após a dessecação da pastagem, foi realizado o plantio direto da cultivar de soja BRASMAX FIBRA IPRO de ciclo tardio (240 mil sementes/ha e 270 kg/ha 04-30-20); os tratos culturais da soja ocorreram com uma aplicação a menos do que o padrão da região; em fevereiro/2024, foi realizado plantio da pastagem *Urochloa ruziziensis* (8,5 kg/ha a lanço via drone durante a fase R5.5 da soja); em março/2024, foi realizada a colheita da soja (produtividade de 72 sc/ha no talhão 1 e 45 sc/ha no talhão 3); em maio/2024, iniciou-se o pastejo de inverno com taxa de lotação média de 1,55 UA/ha até setembro/2024.

O sistema de criação adotado é o de cria. Para a manutenção dos animais durante a safra de soja nos talhões 1 e 3, manteve-se uma área de sistema intensivo exclusivo (30 ha – talhão 2) com *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Em setembro/2022, o solo foi corrigido em superfície com calagem e gessagem (2,5 ton/ha 2:1), em setembro/2023 com calagem (2,7 ton/ha PRNT 70), e em fevereiro/2024 realizou-se a adubação com 300 kg/ha de ureia. Em ambos os anos, a taxa de lotação média do talhão 2 foi de 2,93 UA/ha (considerando alta lotação nas águas e menor lotação no inverno, período em que os animais entraram em pastejo nas áreas de ILP – talhões 1 e 3).

Os valores superiores a 1 do indicador LER (Tabela 19.2) mostram que, numa mesma área, as produ-

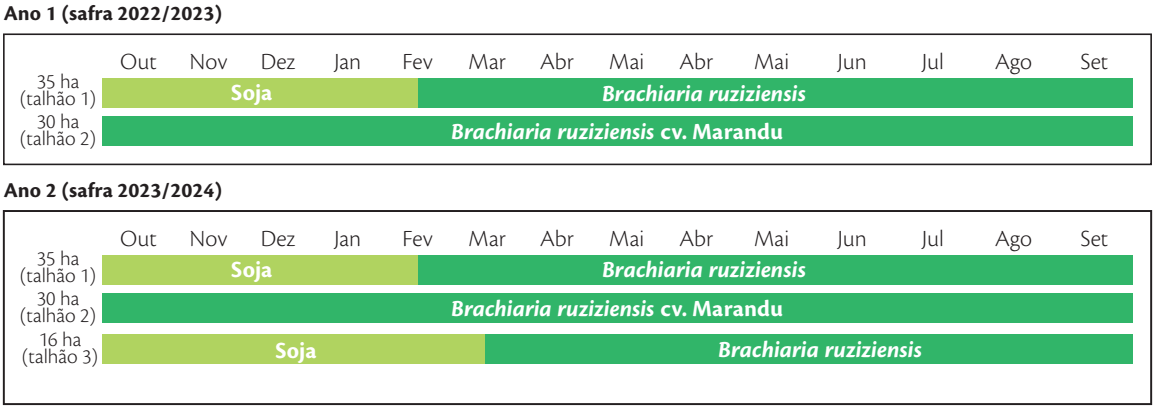


Figura 19.1. Atividades no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

ções obtidas no sistema ILP foram maiores do que as produções em sistemas exclusivos. Nos dois anos avaliados, a produção de soja no talhão 1 foi superior, obtendo 66 sacas/ha (contra 63 sacas/ha no monocultivo da região) em 2022/2023, e 72 sacas/ha (contra 58 sacas/ha no monocultivo) em 2023/2024. A produção da soja no primeiro ano de implantação no talhão 3 (2023/2024) obteve produção igual ao do monocultivo (45 sacas/ha, LER=1). Espera-se aumento de resiliência e de produtividade ao longo dos anos de sistemas ILP, a exemplo do que sugere a LER do Talhão 1 (1,05 no ano 1 e 1,24 no ano 2). Na pecuária, o indicador LER maior que 1 nos talhões 1 e 3 sugere que a capacidade produtiva da pastagem de inverno no sistema ILP (taxa de lotação de 1,55 UA/ha) é superior ao sistema exclusivo no inverno (1 UA/ha). No talhão 2, a pastagem exclusiva manejada de forma intensiva é parte do sistema de produção para a rotação dos animais durante a safra de soja. O pasto do talhão 2 suportou uma carga superior (2,93 UA/ha) à média da região (2 UA/ha), resultando em LER superior (1,47).

Nos dois anos agrícolas, a receita do componente Lavoura foi maior que os custos, resultando em MB positiva (Tabela 19.3). Os itens com maior proporção no custo de produção no primeiro ano foram: mão de obra e serviços terceirizados (30,6%), e corretivos e fertilizantes (30,4%). No segundo ano foram corretivos e fertilizantes (37,7%).

Os custos da pecuária superaram a receita em ambos os anos, resultando em MB negativa (Tabela 19.3). Nesta propriedade rural, o ciclo pecuário tem cerca de dois anos, e a análise da MB refere-se ao fluxo de caixa do ano, sem considerar o estoque de animais. Dentre os custos, aqueles com maior participação referem-se à compra de animais no primeiro ano (45,5%), e mão de obra e serviços terceirizados (32,0%) e corretivos/

Tabela 19.2. Indicador Relação Equivalente do Uso da Terra (LER) da soja, da pecuária, dos talhões e do sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

	1º ano agrícola		2º ano agrícola		
	Talhão 1	**Talhão 2**	**Talhão 1**	**Talhão 2**	**Talhão 3**
LER soja	1,05	–	1,24	–	1,00
LER pecuária	1,55	1,47	1,55	1,47	1,55
LER talhão	1,34	1,47	1,40	1,47	1,28
LER sistema	1,40	...	1,38	...	...

Traço (–): informação não aplicável; três pontos (...): informação não disponível.

Tabela 19.3. Indicadores Margem Bruta (MB, em R$) e Balanço de Nitrogênio (BN, em kg de N) de cada componente e do sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

Receita-custo	**Sem estoque de animais**		**Com estoque de animais**	
	1º ano	**2º ano**	**1º ano**	**2º ano**
MB				
Lavoura total	112.409,23	252.666,99	112.409,23	252.666,99
Pecuária total	-98.260,98	-68.746,87	-82.952,63	-61.432,59
Sistema total	14.148,25	183.920,12	29.456,60	191.234,41
Sistema por ha	217,67	2.270,62	453,18	2.360,92
BN				
Lavoura total	1.343,10	1.130,11	1.343,10	1.130,11
Pecuária total	603,47	4.257,22	532,22	4.241,47
Sistema total	1.946,58	5.387,34	1.875,33	5.371,59
Sistema por ha	29,95	66,51	28,85	66,32

adubos (31,3%) no segundo ano. Parte do rebanho não é vendido no ano avaliado. Há indicativo de que a venda futura desse ativo melhore a MB da pecuária (resultado com estoque de animais).

Na avaliação do sistema ILP total, a receita foi maior que os custos nos dois anos, resultando em MB positiva (Tabela 19.3). Os resultados da MB por hectare do sistema ILP sugerem evolução positiva ao longo do tempo (R$ 217,67 no primeiro ano e R$ 2.270,62 no segundo ano).

Nos dois anos avaliados, a entrada de N foi maior que a saída de N, resultando em BN positivo (Tabela 19.3), tanto no componente lavoura quanto na pecuária, refletindo esse resultado no sistema integrado. Na lavoura, as entradas de N ocorreram principalmente pela FBN (92,7% no primeiro ano e 95,8% no segundo) e, em menor proporção, pelos adubos nitrogenados. Já as saídas se deram pela produção de soja. No componente pecuária, as entradas de N foram pela suplementação animal (65,5%) e aquisição de animais (34,5%) no primeiro ano, enquanto, no segundo ano, foram pela adubação nitrogenada (88,2%) e suplementação animal (11,8%). As saídas ocorreram pela venda de animais. O aumento do BN no segundo ano do sistema integrado (de 29,95 kg de N/ha para 66,51) deve-se em grande medida pela adubação nitrogenada na área de pastagem. Ressalta-se a busca pela neutralidade no BN no sistema integrado, com o objetivo de se ter produção de alimentos e fibras com a preservação do recurso solo. Nesse caso, há indicativo de que a quantidade de N aportada via fertilizante nitrogenado, FBN, suplementação alimentar e animais adquiridos foram suficientes para repor a quantidade de N extraída pelos produtos dos sistemas integrados. Quando a quantidade de N removida do sistema é superior à quantidade aportada no sistema (BN negativo), no longo prazo pode causar a diminuição nos estoques de N e de matéria orgânica do solo (Guareschi et al., 2019). Ressalta-se que o cálculo do indicador BN é uma estimativa das principais entradas e saídas de N do sistema integrado. O balanço completo e detalhado de todas as entradas e saídas exigiria informações muito específicas, custosas e de difícil mensuração.

O indicador que mensura os serviços ecossistêmicos do sistema integrado (MULTI) pode variar entre zero e um, e quanto mais perto de um, melhor é o resultado obtido. O indicador MULTI é composto pelos serviços de provisão (varia entre zero e 0,6) e pelos serviços de regulação e suporte (varia entre zero e 0,4). No sistema ILP, o indicador MULTI foi ligeiramente menor no segundo ano do que no primeiro (Tabela 19.4).

Nos dois anos, os valores obtidos para os serviços de regulação e suporte foram semelhantes (Figura 19.2) e apresentaram as seguintes características:

- O estabelecimento da cultura e/ou da pastagem no sistema ILP foi bom, com poucas falhas na germinação, pouca variação na altura das plântulas, emergência quase normal; as pastagens do sistema ILP permaneceram relativamente verdes, mantendo a produção de matéria seca durante todo o inverno.
- A suscetibilidade das pastagens do sistema ILP à erosão foi baixa, com inexistência de sulcos/valetas, com vegetação na superfície, mas ainda apresentaram solo exposto.

Tabela 19.4. Indicadores Multifuncionalidade (MULTI), Bem-estar Animal (BEA), Percepção Social do Trabalho (PST) e Percepção de Riscos (PR) do sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

	1º ano	2º ano
MULTI[(1)]	0,72	0,64
BEA[(2)]	4,6	4,6
PST[(2)]	3,0	3,17
PR[(2)]	3,75	3,75

[(1)] Valores variando entre zero e um; [(2)] Valores variando entre zero e cinco.

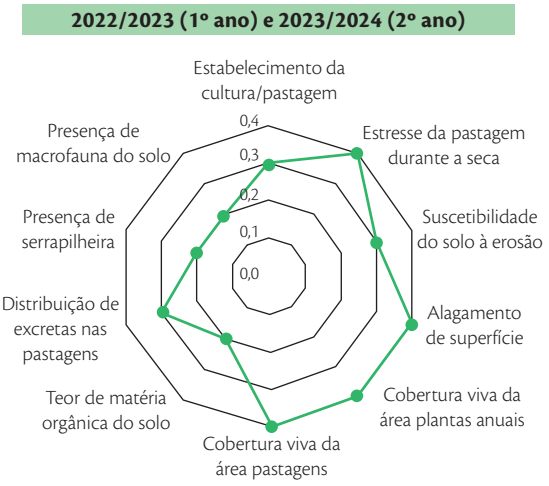


Figura 19.2. Multifuncionalidade dos serviços de regulação e suporte no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

- Após chuvas intensas, em solos que estavam em saturação ou próximos disso, a formação de poças no sistema ILP foi inexistente após 1 dia de chuvas intensas; a cobertura viva da área com lavouras anuais no sistema ILP foi superior a 70%.
- A cobertura viva da área de pastagens no sistema ILP foi maior que 80%, pasto cobrindo toda ou a maior parte da superfície do solo.
- O teor de matéria orgânica do solo no sistema ILP foi médio, entre 20 e 40 g/dm^3.
- A distribuição de excretas nas pastagens no sistema ILP foi em quase toda a área de pastejo, pasto verde e com crescimento pouco diferenciado nessas áreas, sem manchas nas folhas.
- A serrapilheira foi moderadamente presente, em estágio intermediário de decomposição e incorporação na parte superficial do solo.
- A macrofauna do solo (como minhocas, formigas, gafanhotos, besouros) no sistema ILP foi pouco presente, com poucos indícios.

Os serviços de provisão apresentaram valores inferiores no segundo ano principalmente devido à menor produção de soja no talhão 3 (passou de 0,41 no ano 1 para 0,33 no ano 2) (Figura 19.3).

Com relação ao bem-estar animal, nos dois anos avaliados o indicador BEA (Tabela 19.4) mostrou que os pontos relacionados aos cinco domínios da liberdade animal estavam ótimos ou muito próximo disso (Figura 19.4). Na percepção do produtor e do técnico da extensão rural, os animais estavam com boa condição corporal; confortáveis, tranquilos, com respiração regular; sem ferimentos ou dor; sem sinais de medo e angústia; e não se mostraram arredios.

O indicador de percepção social do trabalho PST (Tabela 19.4) mostrou que houve avanço do ano 1 para o ano 2, mas ainda há espaço para melhoria (Figura 19.5). A seguir o resumo das percepções:

- O número de postos de trabalho em função do sistema ILP não se alterou.
- Os colaboradores buscaram informações para o trabalho no sistema ILP na internet/mídias sociais e treinamentos na própria fazenda.
- O produtor buscou informações sobre o sistema ILP na internet/mídias sociais e presencialmente com o técnico/outro produtor.
- O tempo dedicado pelo produtor/sua família ao sistema ILP aumentou, pois o produtor passou a cuidar, entre outras coisas, do plantio da forrageira, da regulagem para plantio direto, do manejo da altura de pastagem, possibilitando, ao final do inverno, a manutenção de cobertura de forragem

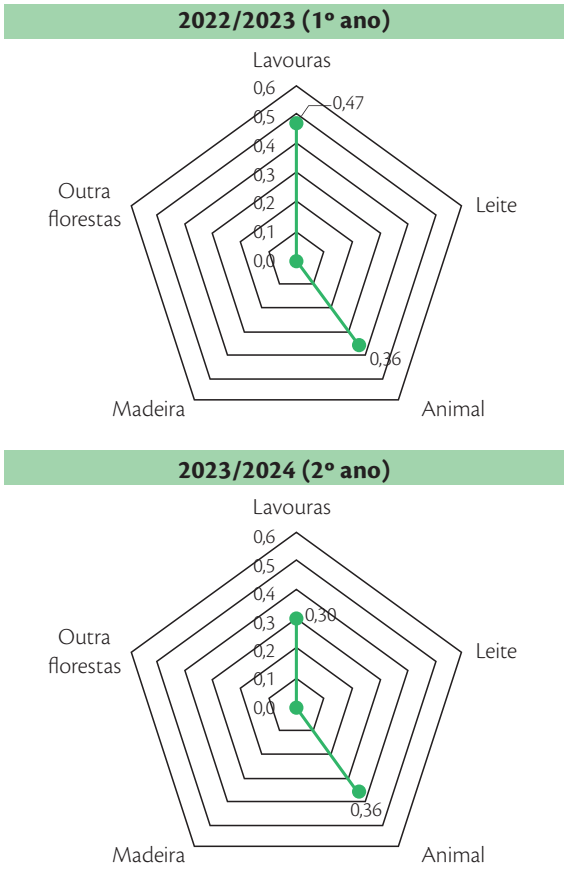


Figura 19.3. Multifuncionalidade dos serviços de provisão no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

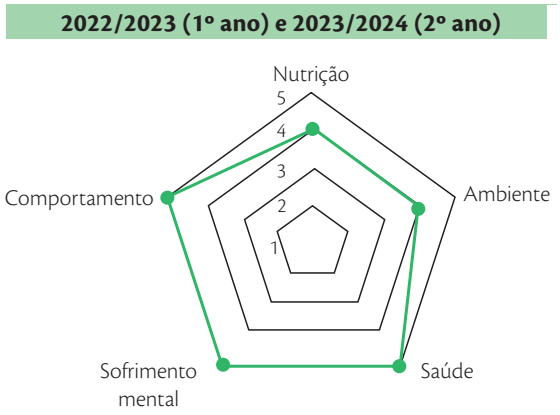


Figura 19.4. Bem-estar Animal (BEA) no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

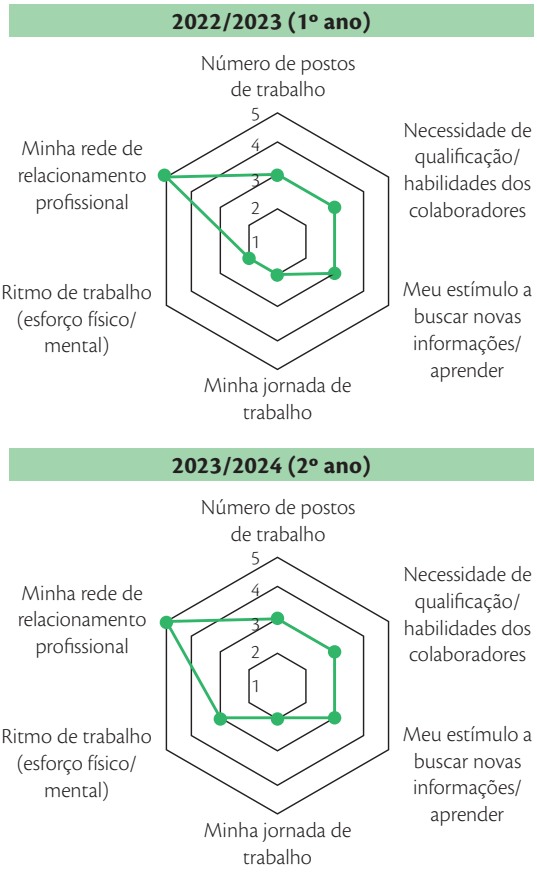


Figura 19.5. Percepção Social do Trabalho (PST) no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

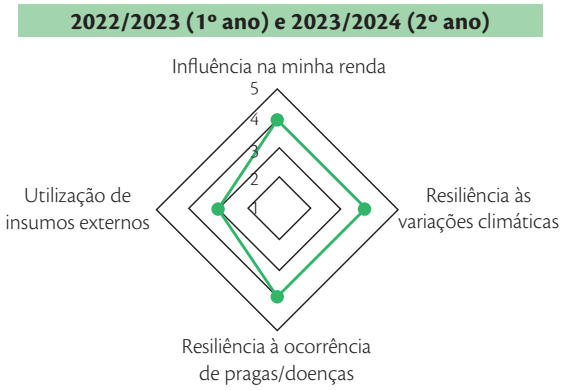


Figura 19.6. Percepção de Risco (PR) no sistema integração lavoura-pecuária (ILP) nos anos agrícolas de 2022/2023 (primeiro ano) e 2023/2024 (segundo ano).

com adequada quantidade para dessecação e realização de plantio direto, etc. Embora tenha aumentado o tempo dedicado à atividade, observou-se que esse tempo foi mais bem aproveitado, pois ao haver aumento de taxa de lotação, o tempo dedicado foi relacionado a uma maior produtividade tanto na pecuária quanto na lavoura.

- O esforço físico e mental em função do sistema ILP foi alto no início, com aumento moderado do volume e intensidade de trabalho, concentrado em algumas tarefas. Porém, no segundo ano já foi normal. No esforço intelectual, considera-se que aumentou o domínio sobre sistemas ILP em relação ao início da implantação do sistema, época na qual houve maior esforço intelectual para definir estratégias.
- Houve um incremento na rede de relacionamento profissional do produtor devido ao trabalho no sistema ILP, com maior interação entre produtor e técnico. Além disso, o produtor buscou novas conexões para obter informações sobre o sistema.

A percepção sobre os riscos PR (Tabela 19.4) foram similares nos dois anos avaliados. Os resultados obtidos foram muito bons (Figura 19.6), com exceção da utilização de insumos externos, almejando-se redução com o decorrer do tempo do sistema ILP. Dessa forma, foram feitas as seguintes considerações:

- A influência do sistema ILP na renda foi boa, com o fluxo de caixa uniforme e maior ao longo do ano.
- Houve um incremento na resiliência do sistema ILP às variações climáticas (seca, geada, etc.) e à ocorrência de pragas e/ou doenças. Observou-se maior produção de soja no sistema ILP do talhão 1 em relação a outras áreas da propriedade rural fora do sistema integrado, mesmo em ano de condições climáticas desafiadoras como em 2023/2024. Adicionalmente, reduziu uma aplicação de defensivos na soja do sistema integrado quando comparado com a soja em outras áreas da propriedade rural.

19.2.2.2 Sistema ILPF

A propriedade com sistema ILPF é localizada no estado de Minas Gerais e possui uma área produtiva de 2.300 ha, com um talhão de 11 ha de sistemas integrados, sendo implantado como ILPF. Os dados desse sistema foram obtidos nas publicações de Borghi et al. (2020) e Gontijo Neto et al. (2020). Três anos agrícolas foram avaliados (Figura 19.7). No ano agrícola de 2017/18 (primeiro ano), o sistema ILPF foi implantado em uma área de pastagem degradada com o intuito de recuperação. Em outubro/2017, o solo foi corrigido; em novembro foi semeado sorgo forrageiro em

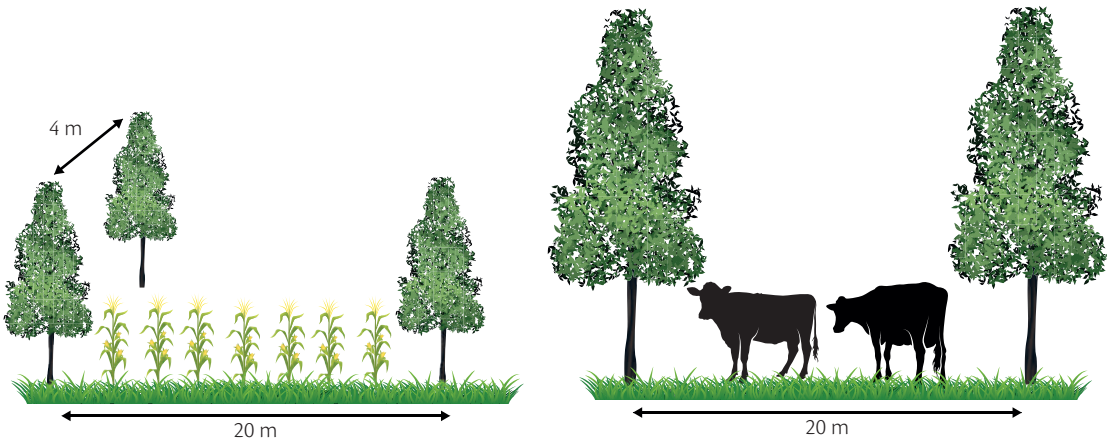


Figura 19.7. Atividades no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

consórcio com o capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) e os renques de eucalipto foram demarcados; em dezembro foi realizada adubação de cobertura; em janeiro/2018, as mudas de eucalipto foram plantadas e foi realizado manejo e tratos culturais no sorgo e no eucalipto que ocorreram também em fevereiro; em março ocorreu a colheita do sorgo (para silagem) e do capim-marandu (fenação); em abril, o pasto do capim-marandu e os eucaliptos foram adubados; de maio a agosto/2018, o pasto permaneceu em rebrota.

No ano agrícola de 2018/19 (segundo ano), o sistema continuou como IPF. De setembro a novembro/2018, o pasto ainda estava sem gado, sendo realizada a adubação nos eucaliptos em outubro; de dezembro/2018 a agosto/2019, o pasto foi ocupado pelo gado, e em agosto foram realizadas adubação e aplicação de defensivos nos eucaliptos. No início do ano agrícola de 2019/2020 (terceiro ano), em setembro, os animais ainda estavam no pasto, e em outubro e novembro/2019, o pasto permaneceu sem gado, ocorrendo adubação nos eucaliptos nesse último mês. Em dezembro/2019, um novo lote de animais ocupou o pasto, permanecendo até o final do ano agrícola (agosto/2020).

No primeiro ano, a LER do sorgo consorciado com a forrageira para produção de feno foram maiores que um (Tabela 19.5), indicando que a produção no sistema integrado foi maior que no monocultivo da região, considerando a mesma área. Ainda neste ano, a LER do sistema ILPF é inferior a um (0,78), pois a produção do sorgo e feno ocupou a área em alguns meses do ano. No restante do tempo não houve produção, pois o pasto estava em rebrota. A produção de sorgo para silagem foi 11,31 ton/ha no ILPF (10 ton/ha no monocultivo) e do capim para fenação foi 9,46 ton/ha no ILPF comparado com (7,9 ton/ha no monocultivo, conforme observado pela equipe técnica).

Nos anos seguintes, os valores da pecuária indicam uma capacidade de suporte de animais superior no

Tabela 19.5. Indicador Relação Equivalente do Uso da Terra (LER) do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e seus componentes nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

	1º ano	2º ano	3º ano
LER sorgo	1,13	–	–
LER feno de *Brachiaria*	1,20	–	–
LER pecuária	–	1,74	1,74
LER eucalipto	–	0,06	0,01
LER sistema	0,78	1,36	1,47

Traço (–): informação não aplicável.

sistema integrado do que a pecuária em sistema exclusivo, considerando a mesma área. A lotação animal foi 1,01 UA/ha no ILPF (0,58 UA/ha no monocultivo) no primeiro e segundo anos. Quando comparado ao sistema de monocultivo de eucalipto, observou-se o comportamento inverso. A menor produção de madeira no sistema integrado é explicada pela menor densidade de árvores em uma mesma área de sistema integrado (comparado a um cultivo exclusivo de eucalipto) e pelo início do ciclo produtivo, com árvores ainda baixas e com circunferência pequena. A produção estimada de madeira no ILPF foi de 2,26 m^3/ha no primeiro ano e 2,84 m^3/ha no segundo. No sistema exclusivo, o valor considerado foi de 41 m^3/ha.

No entanto, quando se analisa a LER conjunta dos componentes, observa-se a evolução positiva da produção integrada ao longo dos anos (0,78; 1,36 e 1,47, respectivamente), indicando uma condição vantajosa de maior produção para uma mesma área, quando comparado com os sistemas exclusivos.

Com relação ao resultado econômico, observa-se na Tabela 19.6 que a receita obtida com a venda do feno e da silagem de sorgo no primeiro ano foi superior aos custos, resultando em margem bruta positiva para lavoura (R$ 4.905,12). Os principais itens de custo foram mão de obra temporária e serviços terceirizados (42,8%) e corretivos e fertilizantes (40,5%). Na pecuária, as primeiras vendas ocorreram no ano 3, acarretando margem negativa nos anos iniciais de implantação do sistema. Os principais itens de custo da pecuária foram corretivos e fertilizantes (81,6%) no primeiro ano, e compra de animais no segundo e terceiro anos (81,6% e 80,1%, respectivamente). O componente florestal não teve receita nos três anos avaliados. Os principais custos de implantação dos eucaliptos foram mão de obra e serviços terceirizados (47,8%) no primeiro ano, corretivos e fertilizantes no segundo e terceiro anos (89% e 88,4%, respectivamente). A avaliação do sistema ILPF total mostra que os custos foram maiores que a receita nos três anos avaliados, resultando em MB negativa (-R$74,31/ha, -R$2889,72/ha, -R$265,88/ha, respectivamente). Trata-se de anos iniciais de implantação do sistema ILPF. No entanto, é importante observar que existe um estoque de gado e de madeira em pé não vendido. Embora esses ativos não tenham sido comercializados no período analisado, ao se valorar esses ativos nos preços dos anos avaliados, há indicativo de que esse estoque possa contribuir para o aumento gradual da MB do sistema ILPF (-R$74,31/ha, R$649,72/ha, R$999,09/ha, respectivamente).

Com relação ao BN (Tabela 19.6), a lavoura apurou menor entrada de N pela adubação nitrogenada em relação à saída pela produção de grãos, resultando em BN negativo (-2.186,68). Com relação ao compo-

Tabela 19.6. Indicadores Margem Bruta (em R$) e Balanço de Nitrogênio (BN, em kg de N) de cada componente e do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

	Sem estoque			Com estoque (animais e madeira)		
Receita-custo	**1º ano**	**2º ano**	**3º ano**	**1º ano**	**2º ano**	**3º ano**
MB						
Lavoura total	4.905,12	–	–	4.905,12	–	–
Pecuária total	-1.810,60	-30.686,93	-113,90	-1.810,60	7.129,47	12.394,30
Floresta total	-3.911,88	-1.100,00	-2.810,75	-3.911,88	17,44	-1.404,29
Sistema total	-817,36	-31.786,93	-2.924,65	-817,36	7.146,91	10.990,01
Sistema por ha	-74,31	-2889,72	-265,88	-74,31	649,72	999,09
BN						
Lavoura total	-2186,68	–	–	-2186,68	–	–
Pecuária total	506,00	1.187,60	548,05	506,00	1.004,03	564,03
Floresta total	55,29	110,00	198,26	55,29	89,51	172,48
Sistema total	-1.625,39	1.297,60	746,31	-1.625,39	1.093,54	736,50
Sistema por ha	-147,76	117,96	67,85	-147,76	99,41	66,95

Traço (–): informação não aplicável.

nente animal, nos dois anos iniciais não houve saída de N do sistema. No terceiro ano houve saída de N pela venda de parte do rebanho. As entradas de N ocorreram pela adubação nitrogenada dos pastos (100%) no primeiro ano, e pela adubação nitrogenada dos pastos (89,5% e 83,1% do N, respectivamente) e aquisição de animais (10,5% e 16,9% do N, respectivamente) no segundo e terceiro anos. O componente florestal teve somente entradas de N (adubação nitrogenada) nos anos iniciais, resultando em BN positivo. Na avaliação geral do sistema ILPF, verificou-se BN negativo no primeiro ano influenciado pela lavoura e BN positivo nos anos seguintes em função da fertilização das árvores, pastos e aquisição de animais superior à venda de animais. O padrão se mantém ao considerar o estoque de árvores e animais, com ligeira melhoria do indicador (mais próximo da neutralidade).

O indicador MULTI do sistema integrado foi semelhante nos dois primeiros anos (Tabela 19.7), com ligeiro aumento no terceiro ano agrícola, devido ao aumento nos serviços de regulação e suporte. A Figura 19.8 mostra os serviços de provisão nos anos avaliados.

A Figura 19.9 apresenta o comportamento dos serviços de regulação e suporte ao longo dos três anos avaliados. Os valores foram 0,31 nos dois primeiros anos e 0,33 no terceiro (variando entre zero e 0,4). De forma resumida, observou-se:

- O estabelecimento da cultura e/ou da pastagem no sistema ILPF evoluiu de moderado (com nº mediano de falhas na germinação, resultando em grande variação na altura das plântulas, emergência moderadamente lenta, mas com recuperação após o período de restrição hídrica) para muito bom (sem falhas na germinação, altura das plântulas uniforme, emergência normal, boa colheita de silagem).
- As pastagens do sistema ILPF no primeiro ano (implantação) possuíam algumas partes secas, embora áreas verdes fossem muito presentes, com produção de matéria seca baixa, o que acarretou no atraso da recuperação após as primeiras chuvas. Nos anos subsequentes, a situação mudou, chegando mais próxima do ideal, com as pastagens relativamente verdes, com média na produção de matéria seca, e com recuperação rápida logo após as primeiras chuvas.
- A suscetibilidade das pastagens do sistema ILPF à erosão foi muito baixa durante os três anos, com inexistência de sulcos/valetas, sem solo exposto, com grande quantidade de vegetação na superfície.
- Após chuvas intensas, em solos que estavam em saturação ou próximos disso, a formação de poças

Tabela 19.7. Indicadores Multifuncionalidade (MULTI), Bem-estar Animal (BEA), Percepção Social do Trabalho (PST) e Percepção de Riscos (PR) do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

	1º ano	2º ano	3º ano
MULTI[1]	0,91	0,91	0,93
BEA[2]	–	4,8	4,6
PST[2]	3,33	3,50	3,83
PR[2]	2,0	3,5	4,0

[1] Valores variando entre zero e um; [2] Valores variando entre zero e cinco. Traço (–): informação não aplicável.

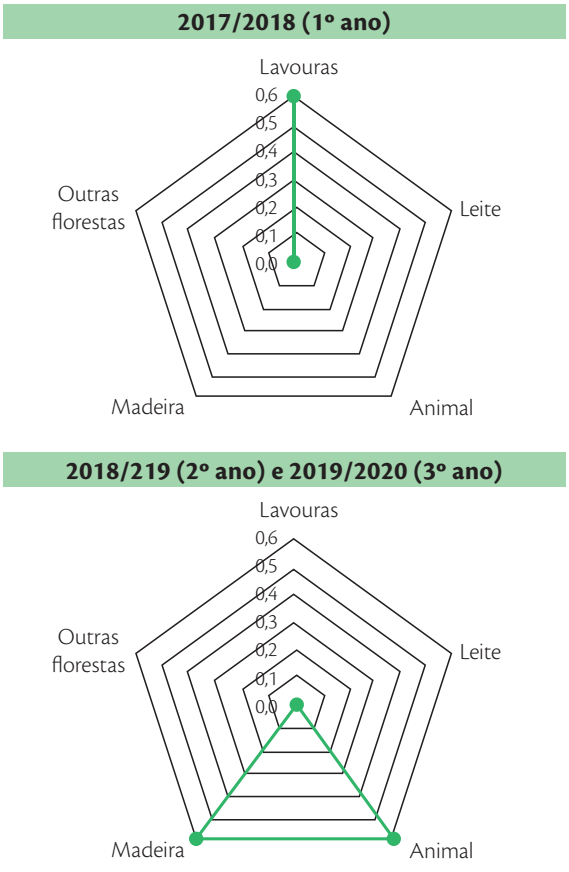


Figura 19.8. Multifuncionalidade dos serviços de provisão no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/19 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

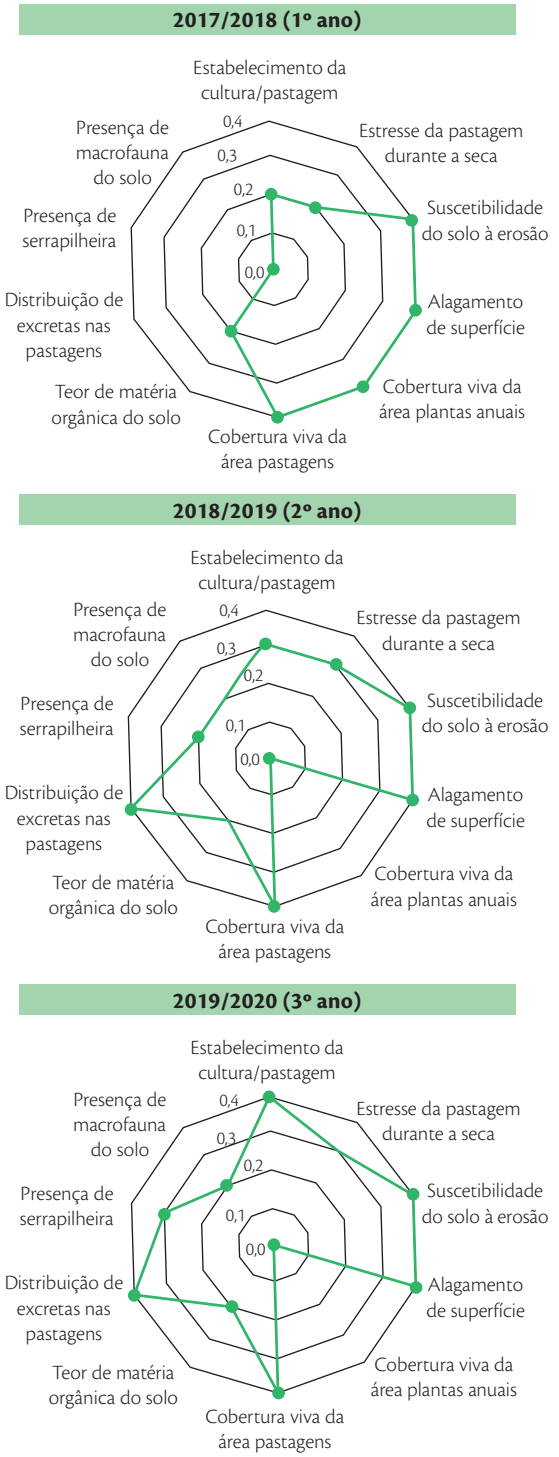


Figura 19.9. Multifuncionalidade dos serviços de regulação e suporte no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

no sistema ILPF foi inexistente, após um dia de chuvas intensas.

- A cobertura viva da área com lavouras anuais foi superior a 70% no ano que teve esse componente no sistema ILPF.
- A cobertura viva da área de pastagens no sistema ILPF foi maior que 80%, pasto cobrindo toda ou a maior parte da superfície do solo.
- O teor de matéria orgânica do solo no sistema ILPF foi médio, entre 20,1 e 40 g/dm^3, nos três anos avaliados.
- A distribuição de excretas durante a ocupação das pastagens (segundo e terceiro ano) foi uniforme em toda a área de pastejo, com pasto verde escuro e com crescimento uniforme, sem manchas nas folhas.
- A serrapilheira evoluiu do segundo (moderadamente presente, em estágio intermediário de decomposição e incorporação na parte superficial do solo) para o terceiro ano (presente, com alguns resíduos bem decompostos e incorporados ao solo.
- A macrofauna do solo (como minhocas, formigas, gafanhotos, besouros) no sistema ILPF foi pouco presente, com poucos indícios, no segundo e terceiro ano de avaliação.

O indicador BEA (Tabela 19.7) mostrou que todos os pontos relacionados aos cinco domínios da liberdade animal estavam adequados. Dessa forma, na percepção da equipe que acompanhou a implantação do sistema ILPF na propriedade, nos anos em que os animais ocuparam o pasto (Figura 19.10): os animais estavam confortáveis, tranquilos, com respiração regular; sem ferimentos ou dor; sem sinais de medo; e não se mostraram arredios. Em relação à nutrição, a percepção foi diferente entre os anos avaliados, com os animais apresentando um escore de condição corporal normal no segundo ano e obesos no terceiro.

O aumento do indicador PST foi gradual nos três anos avaliados (Tabela 19.7). A percepção dos resultados obtidos (Figura 19.11) foi:

- O número de postos de trabalho em função do sistema ILPF não se alterou.
- No primeiro ano, a necessidade de qualificação e de habilidades dos colaboradores foi muito alta (buscou informações na internet/mídias sociais, treinamentos na própria fazenda, e eventos técnicos como Dias de Campo e treinamentos específicos em cursos de curta duração – 8h a 40h – presencial/*on-line*). Por outro lado, nos anos subsequentes essa necessidade foi somente alta (buscou informações

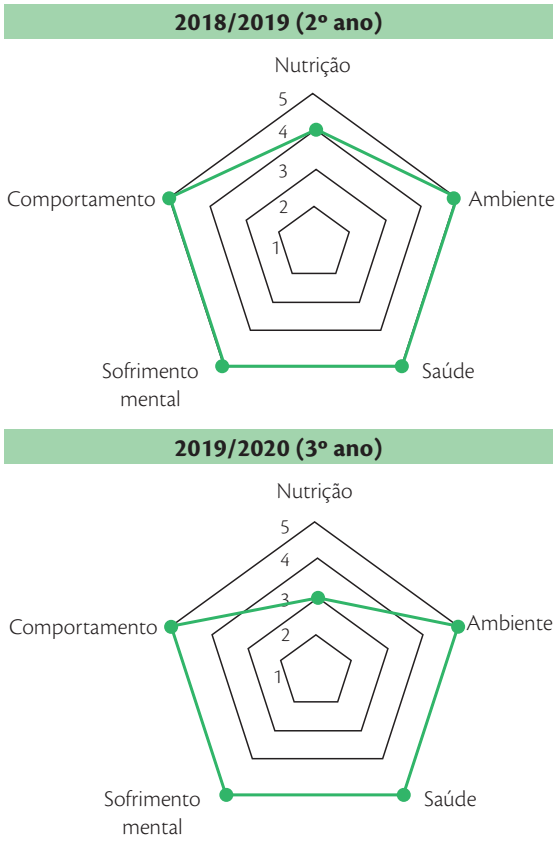


Figura 19.10. Bem-estar Animal (BEA) no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), nos anos com gado (2018/2019 e 2019/2020).

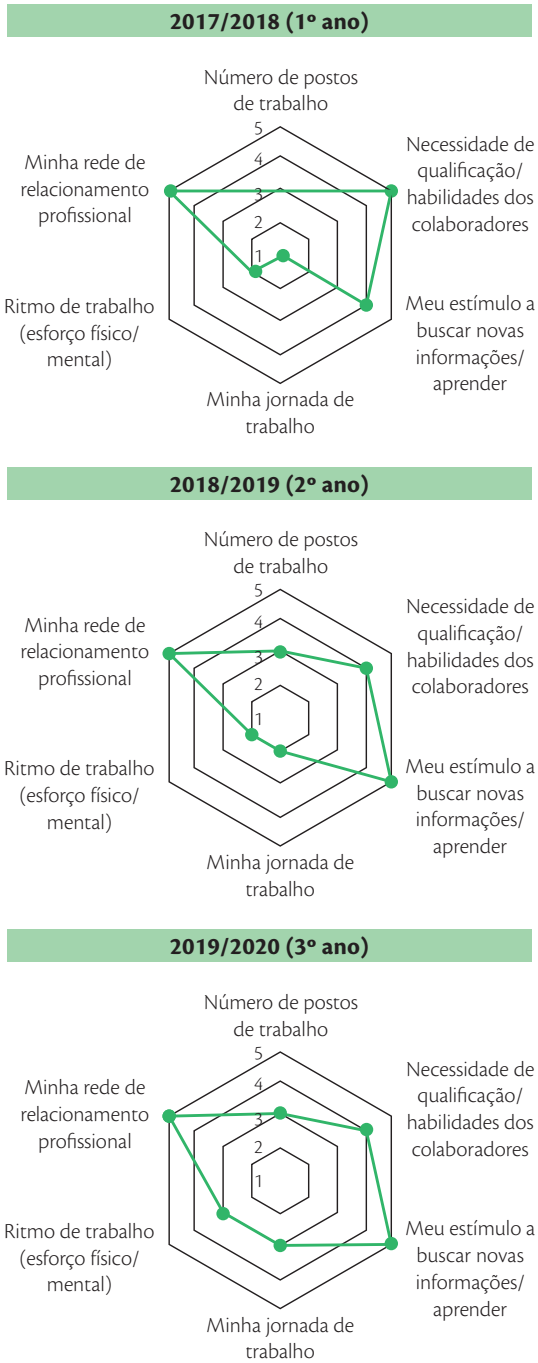


Figura 19.11. Percepção Social do Trabalho (PST) no sistema de integração no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

na internet/mídias sociais, treinamentos na própria fazenda e eventos técnicos como dias de campo).

- No primeiro ano, o estímulo do produtor a buscar novas informações e a aprender sobre o sistema ILPF foi alto (buscou informações na internet/mídias sociais presencialmente com o técnico/outro produtor; em eventos técnicos como dias de campo). Por outro lado, nos anos subsequentes esse estímulo foi muito alto (buscou informações na internet/mídias sociais, presencialmente com o técnico/outro produtor; em eventos técnicos como dias de campo; em cursos de curta duração entre 8h e 40h – presencial/*on-line*).
- O tempo dedicado pelo produtor/sua família ao sistema ILPF aumentou muito no primeiro ano agrícola, durante a implantação do sistema ILPF, tendo um menor aumento do segundo e terceiros anos, quando o produtor conhece mais o sistema, e o sistema finaliza a fase de implantação.
- O esforço físico e mental em função do sistema ILPF foi alto nos dois primeiros anos, com aumento moderado do volume e intensidade de trabalho, concen-

trado em algumas tarefas. Porém, no terceiro ano já foi normal.

- A rede de relacionamento profissional do produtor devido ao trabalho no sistema ILPF aumentou com novas conexões e interação com outros produtores, técnicos, outros profissionais da agropecuária e grupos virtuais.

O indicador PR demonstrou a melhora dos pontos relacionados aos riscos de produção com o decorrer do tempo (Tabela 19.7). Os resultados obtidos (Figura 19.12) foram:

- A influência do sistema ILPF na renda foi ruim nos dois primeiros anos, e no terceiro ano, pela percepção da equipe, a influência começou a melhorar (o fluxo de caixa ao longo do ano esteve uniforme e maior).
- A resiliência do sistema ILPF às variações climáticas melhorou gradualmente com o tempo, chegando a muito resiliente.
- A resiliência do sistema ILPF à ocorrência de pragas e/ou doenças reduziu (pouco resiliente) no primeiro ano, aumentando (resiliente) nos anos subsequentes.
- A utilização de insumos externos no sistema ILPF aumentou muito (muito mais insumos externos) no primeiro ano, mantendo a quantidade de uso de insumos externos nos anos seguintes. Em grande medida devido à implantação do sistema ILPF.



Figura 19.12. Percepção de Risco (PR) no sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), nos anos agrícolas de 2017/2018 (primeiro ano), 2018/2019 (segundo ano) e 2019/2020 (terceiro ano).

19.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a aplicação de indicadores que avaliam aspectos econômicos, ambientais e sociais em dois sistemas de ILPF. Esses indicadores são: Relação equivalente do uso da terra (LER), Margem Bruta (MB), Bem-Estar Animal (BEA), Balanço de Nitrogênio (BN), Multifuncionalidade (MULTI), Percepção Social do Trabalho (PST) e Percepção de Riscos (PR). Os resultados das aplicações dos indicadores em duas propriedades rurais, uma com sistema ILP e outra com sistema ILPF, demonstraram que os indicadores desenvolvidos são ferramentas úteis para acompanhar a evolução e o impacto dos sistemas ILPF ao longo dos anos e indicam os pontos fortes, os gargalos e os pontos de intervenção para melhoria, considerando o arranjo de cada sistema de integração. Por meio dos indicadores, observou-se a melhoria da sustentabilidade com a implantação de sistemas ILPF no tempo avaliado. Há indicativo de que a produção integrada é rentável e resiliente a longo prazo, pois diversifica a produção otimizando serviços ambientais. Ressalta-se que o estudo tratou de exemplificar o uso dos indicadores em sistemas integrados. Recomenda-se a aplicação por um período de tempo mais longo.

19.4 REFERÊNCIAS

AUGSTBURGER, H.; JACOBI, J.; SCHWILCH, G.; RIST, S. Agroecosystem service capacity index: a methodological approach. **Landscape Online**, v. 64, p. 1-48, 2018. http://doi.org/10.3097/LO.201864.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (ed.). **Marco referencial**: integração lavoura-pecuária-floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.

BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; RESENDE, A. V.; SIMÃO, E. P.; ABREU, S. C.; GIEHL, J.; SANTANA, D. P.; ALVARENGA, R. C.; CAMPANHA, M. M.; COSTA, T. C. C.; RESENDE, R. M. S. **Intensificação agropecuária no Cerrado**: implantação de sistema ILPF com as culturas do sorgo forrageiro, capim Marandu e Eucalipto na região Central de Minas Gerais. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 207).

DEB, D.; DUTTA, S. The robustness of land equivalent ratio as a measure of yield advantage of multi-crop systems over monocultures. **Experimental Results**, v. 3, p. 2, 2022. http://doi.org/10.1017/exp.2021.33.

FREUDENBERG, M. **Composite indicators of country performance**: a critical assessment. Paris: OECD Publishing, 2003. 35 p.

GODINOT, O.; CAROF, M.; VERTÈS, F.; LETERME, P. SyNE: an improved indicator to assess nitrogen efficiency of farming systems. **Agricultural Systems**, v. 127, p. 41-52, 2014. http://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.003.

GODOY, D. O. **Análise econômica de um sistema de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta (ILPF) no município de Brotas-SP**: um estudo de caso com economia de escopo. 64 f. 2020. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

GONTIJO NETO, M. M.; RESENDE, A. V.; BORGHI, E.; CAMPANHA, M. M.; COSTA, T. C. C.; SIMÃO, E. P.; GIEHL, J.; ABREU, S. C.; ALVARENGA, R. C. **Intensificação agropecuária no Cerrado**: coeficientes técnicos e análise financeira de sistema ILPF com diferentes níveis de investimento tecnológico. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 268).

GUARESCHI, R. F.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; SARKIS, L. F.; MARTINS, M. D. R.; JANTALIA, C. P.; CABRIALES, J. J. P.; NÚÑEZ, J. A. V.; URQUIAGA, S. Balanço de nitrogênio, fósforo e potássio na agricultura da América Latina e o Caribe. **Terra Latinoamericana**, v. 37, n. 2, p. 105-119, 2019. http://doi.org/10.28940/terra.v37i2.423.

MANNING, P.; VAN DER PLAS, F.; SOLIVERES, S.; ALLAN, E.; MAESTRE, F. T.; MACE, G.; WHITTINGHAM, M. J.; FISCHER, M. Redefining ecosystem multifunctionality. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, n. 3, p. 427-436, 2018. http://doi.org/10.1038/s41559-017-0461-7.

MATSUNAGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N. Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, v. 23, n. 1, p. 123-139, 1976.

MEAD, R.; WILLEY, R. W. The Concept of a "Land Equivalent Ratio" and Advantages in Yields from Intercropping. **Experimental Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 217-228, 1980. http://doi.org/10.1017/S0014479700010978.

MELLOR, D. J. Updating animal welfare thinking: Moving beyond the "Five Freedoms" towards "a Life Worth Living". **Animals**, v. 6, n. 3, p. 21, 2016. http://doi.org/10.3390/ani6030021.

OLIVEIRA, P. D.; TAVARES, S. R. L.; MARTINS, A. L. S.; RALISCH, R.; HERNANI, L. C. **Proposta de índice de qualidade participativo do plantio direto para condições de irrigação por pivô central-IQPi**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 119).

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **OECD environmental indicators**: development, measurement and use. Paris: OECD, 2003. 37 p.

SANCHES, O. M. **Dicionário de orçamento, planejamento e áreas afins**. 2. ed. Brasília: OMS, 2004. 295 p.

STURCK, J.; VERBURG, P. H. Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change. **Landscape Ecology**, v. 32, n. 3, p. 481-500, 2017. http://doi.org/10.1007/s10980-016-0459-6.

VINHOLIS, M. M. B.; JANUSCKIEWICZ, E. R.; SANTOS, S. A.; MORI, C. de; PORTUGAL, J. A. B.; BORGHI, E.; PEZZOPANE, J. R. M.; SILVA, C. H. P.; HERNANDES, A.; CRUZ, A. P. S. **Proposta de indicadores para diagnóstico e acompanhamento de sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2025. 52 p. (Documentos, 150).

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M. S.; CARRE, M. J.; BARIONI JUNIOR, W.; BERNARDO, R.; CASACA, A. A.; ROJAS, D. C.; TOKUDA, F. S.; PELINSON, G. J. B.; SANTOS JUNIOR, A.; GONÇALVES JÚNIOR, I. D.; ANDRAUS, J. T. K.; JUSTO, J. S.; MARTINES, L.; GUERREIRO, M. F.; FADEL, S. A. O.; BORGES, W. L. B. **Adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em São Paulo**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2020. 56 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 47).

Capítulo 20

Inovação e Sustentabilidade

Sergio Raposo de Medeiros, Sandra Aparecida Santos,
Alberto Carlos de Campos Bernardi, José Ricardo Macedo Pezzopane,
Alexandre Berndt, Henrique de Antunes Souza, Roberto Giolo de Almeida,
Marcela de Melo Brandão Vinholis



RESUMO: Os sistemas integrados de produção agropecuária, que superaram 17 milhões de hectares no Brasil até 2020, destacam-se pela capacidade de aumentar a produtividade, promover benefícios ambientais e gerar retorno econômico aos produtores. Essas tecnologias contribuem para o aumento de matéria orgânica e carbono no solo, melhorando sua qualidade e resiliência. Para mensurar o sequestro de carbono estão surgindo novas possibilidades com a adoção de inovações como equipamentos modernos de análise e modelagem de dados. Os sistemas integrados elevam a produtividade vegetal e animal, em função da diversificação, consorciação de espécies e manejo estratégico, favorecendo também o bem-estar animal, principalmente em situações de estresse térmico. Ferramentas de agricultura digital e inteligência artificial surgem como aliados na gestão eficiente e sustentável desses sistemas, otimizando insumos e tomada de decisão. No contexto das mudanças climáticas, os sistemas integrados são reconhecidos por seu papel na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas nacionais e globais, como o Plano ABC e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Por fim, políticas públicas e mecanismos financeiros são fundamentais para ampliar a adoção dessas práticas, tornando a agropecuária brasileira referência em sustentabilidade e inovação.

Palavras-chave: Bem-estar Animal; Inovação Tecnológica Agropecuária; Mitigação de Gases de Efeito Estufa; Sistemas Integrados; Sequestro de Carbono; Sustentabilidade.

ABSTRACT: Integrated crop-livestock-forestry systems, which exceeded 17 million hectares in Brazil by 2020, stand out for their ability to increase productivity, promote environmental benefits, and generate economic returns for producers. These technologies help increase organic matter and soil carbon, improving soil quality and resilience.

https://doi.org/10.4322/9786586819427-20

New opportunities are emerging to measure carbon sequestration through innovations such as modern analysis and modeling tools. Integrated systems increase plant and animal productivity through diversification, intercropping, and strategic management, while also favoring animal welfare, especially during thermal stress. Digital agriculture tools and artificial intelligence emerge as allies in the efficient and sustainable management of these systems, optimizing inputs and decision-making. In the context of climate change, integrated systems are recognized for their role in mitigating greenhouse gas emissions, aligning with national and global goals, such as the ABC (Low Carbon Agriculture) Plan and the UN Sustainable Development Goals (SDGs). Finally, public policies and financial mechanisms are fundamental to expanding the adoption of these practices, making Brazilian agriculture a benchmark in sustainability and innovation.

Keywords: Agricultural Technological Innovation; Animal Welfare; Carbon Sequestration; Greenhouse Gas Mitigation; Integrated Systems; Sustainability.

20.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção integrados, incipientes no início deste século, ocupavam, em 2020, uma área estimada superior a 17 milhões de hectares (Polidoro et al., 2021). Foi um crescimento muito maior do que o esperado, especialmente devido aos próprios benefícios biofísicos e ao retorno econômico, logo percebidos pelos agropecuaristas.

Por várias de suas características, os sistemas integrados podem fazer ainda mais diferença no cenário de um mundo com demanda crescente de recursos (alimentos, energia, fibra, etc.), mas cada vez com mais restrições, incluindo a redução de áreas passíveis de produção de alimentos e condições climáticas anômalas. Além disso, os sistemas integrados contribuem para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Neste capítulo, são destacados alguns pontos que fazem dos sistemas integrados uma aposta certa num futuro melhor para a humanidade, revendo muito do que foi visto nos 19 capítulos que o precedem, mas dando ênfase às oportunidades do porvir que, se bem aproveitadas, podem aumentar muito a área de abrangência das integrações, bem como na sua efetividade em aumentar a renda aos produtores, de gerar benefícios ambientais e na garantia da segurança alimentar e energética das nossas sociedades.

20.2 SOLOS SOB OS SISTEMAS INTEGRADOS

Os sistemas integrados apresentam uma gama de vantagens em relação à produção isolada de seus componentes. Todavia, provavelmente o fator mais determinante é o aumento da matéria orgânica (MO) do solo, especialmente no componente de pastagem. Na Figura 20.1, pode-se observar que 13 anos do cultivo de soja reduziram a MO do solo em quase uma unidade percentual, mas nove anos de pastagem foram capazes de elevar a um nível ainda mais alto do que o valor inicial, estocando 1,67 tonelada de MO por hectare a cada ano, sendo que o C é o principal componente da matéria orgânica.

A vantagem vai além do aporte de nutrientes proporcionado pela MO, pois duas características das raízes das forrageiras tropicais — sua abundância e o formato de "cabeleira" (fasciculada) — permitem explorar um maior volume de solo. Há, também, maior formação e estabilidade de macroagregados (> 2 mm), que ajudam na infiltração e retenção de água, assim como na melhoria das condições químicas do solo (Salton; Tomazi, 2014). Em conjunto, todas essas alterações aumentam a resiliência ao estresse hídrico e permitem uma resposta mais eficiente à adubação, especialmente à fosfatada.

O carbono é o elemento central nas medidas ambientais usadas globalmente, devido à sua relação com as mudanças climáticas e o aquecimento global. Nas análises de balanço de carbono, é muito importante avaliar o carbono "armazenado" no solo, que, em grande medida, está contido em sua matéria orgânica. No entanto, mensurar a quantidade de carbono no solo é uma tarefa trabalhosa e custosa. A grande inovação, especialmente em relação ao carbono sequestrado no solo, é a disponibilidade de dois novos equipamentos: um que realiza a coleta de amostras em profundidade (Saci) e outro que determina o teor de C e a densidade do solo por meio de um feixe de laser de alta energia. Este é o Aglibs, equipamento desenvolvido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária (Figura 20.2), que ainda determina a fertilidade e textura. Essas duas tecnologias, de coleta e de análise,

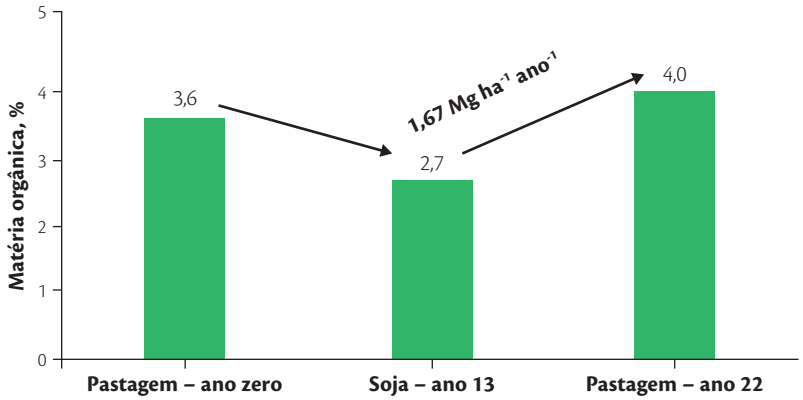


Figura 20.1. Teor de matéria orgânica ao longo de 13 anos de cultivo de soja em uma área original de pastagem, seguida de nove anos de manutenção de pastagem.
Fonte: Adaptado de Sousa et al. (1997).



Foto: (A e B) Banco de imagens Embrapa; (C e D) Alberto Carlos de Campos Bernardi.

Figura 20.2. Equipamento Aglibs desenvolvido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária já com sua determinação de densidade do solo validada pela certificadora Verra (A, B). Amostrador de solo para amostras indeformadas (C, D).

resolvem um dos grandes gargalos operacionais na determinação do teor de C no solo: a necessidade de abrir trincheiras no campo para coletar amostras indeformadas de diferentes profundidades. Outra limitação seria a aceitação, pelas certificadoras, da análise com o Aglibs, mas essa fase também foi ultrapassada com a aprovação pela Verra (Verra, 2025), a maior certificadora de negócios envolvendo créditos de carbono do mundo. Outra inovação relevante para a mesma finalidade é uma modelagem que utiliza a técnica de assimilação de dados, pela qual, em função de cada novo dado obtido por análise, o modelo é reparametrizado; ou seja, novos coeficientes são gerados para fazer parte do novo algoritmo, o que permite maior acurácia e precisão nas estimativas de C no solo.

Para o futuro, além de técnicas e modelagens que permitam uma melhor avaliação do C no solo, será preciso continuar aprofundando o conhecimento sobre suas frações e suas dinâmicas de oxidação, para que, enfim, o sequestro de C nos solos seja incluído nos balanços oficiais de carbono. Isso não seria importante apenas por ser mais justo, mas também porque há, como mencionado acima, inúmeras vantagens agronômicas em aumentar o C no solo, uma característica marcante dos sistemas integrados.

Outra técnica já explorada e que ganhará maior destaque nos próximos anos é a avaliação do microbioma do solo, particularmente da rizosfera. Diferentes práticas de manejo, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária-floresta, contribuem de maneira distinta para as respostas das comunidades bacterianas e arqueanas da rizosfera das plantas, com impactos na tolerância às adversidades, na eficiência no uso de nutrientes e nos estresses abióticos (Costa et al., 2024a, 2024b). Assim, conhecer as comunidades bacterianas associadas às diferentes modalidades de sistemas integrados permite compreender seus mecanismos de atuação, o que abre a possibilidade de interferir neles. Os sistemas com presença do componente arbóreo apresentam predominância de alguns grupos de bactérias distintos dos sistemas de integração lavoura-pecuária, o que impacta na ciclagem de nutrientes e na dinâmica de degradação da matéria orgânica, contribuindo para justificar o maior aporte de C e superioridade para estes sistemas quando se menciona capacidade de se estocar C (Funnicelli et al., 2025). Neste contexto, a complexa interação microbiana no solo e na rizosfera representa um desafio para a tradução dos resultados em aplicações práticas, o que exige mais estudos, considerando a diversidade de tipos de solo e de condições climáticas (Costa et al., 2024a, 2024b).

20.3 A PRODUÇÃO VEGETAL E ANIMAL NOS SISTEMAS INTEGRADOS

Uma característica dos sistemas de ILP é aumentar a produtividade de cada um dos seus componentes em relação aos sistemas solteiros. Por exemplo, no caso da soja cultivada sobre pastagem previamente ocupada por animais, há um aumento de produtividade de 5% a 20% (Franchini et al., 2015). No caso da pecuária, o pasto que fica após a colheita das culturas, o chamado "pasto safrinha" (Figura 20.3), permite, mesmo em plena seca, desempenhos equivalentes aos da época das águas. Em estudos de campo, novilhos cruzados alcançaram um ganho de peso diário (GMD) de 0,800 kg/animal/dia, enquanto animais Nelore atingiram 0,717 kg/animal/dia, sob uma lotação de 2,81 UA/ha e com oferta de 600 g/cabeça.dia de suplemento (Carvalho et al., 2021).

No caso dos ILPF, as relações com a produtividade dos componentes são mais complexas, e o principal fator é a redução da luminosidade que atinge o dossel das culturas vegetais (incluindo pastagens) devido à sombra das árvores. No caso das pastagens, apesar da tolerância relativa das forrageiras tropicais, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) deve ser mantida acima de 65% para evitar a redução da produção de biomassa (Pezzopane et al., 2024). Além da redução na quanti-



Foto: Sergio Raposo de Medeiros.

Figura 20.3. Imagem de um pasto safrinha em agosto de 2017, em Naviraí-MS, após a colheita de soja, e, ao fundo, um pasto convencional, evidenciando claramente a diferença na qualidade nutritiva e na quantidade de biomassa.

dade, há uma tendência de os perfilhos sob a sombra a estiolarem, aumentando a relação haste:colmo e reduzindo a densidade do dossel, o que pode implicar bocados menores e desfavorecer a ingestão de matéria seca pelo animal (Carvalho et al., 2001). Dessa forma, apesar de um aumento no valor nutritivo da forragem à sombra e do maior conforto térmico do animal, não necessariamente ocorre aumento no ganho de peso, o que é mais provável em locais com maior desafio térmico para os animais (latitudes mais baixas, mais próximas do equador). Nesses locais, o alívio da sombra para o estresse térmico a que o animal é exposto em pleno sol pode fazer o animal ter melhor desempenho.

Algumas inovações que devem ser consideradas para a produção das culturas agrícolas seriam uma maior adoção do sistema **Antecipe** (Embrapa, 2025a) ou **Antecipasto** (Embrapa, 2025b), no caso de janelas muito curtas de plantio, conforme indicado pelo zoneamento climático. Nessa mesma linha, a colheita antecipada para a produção de grãos de milho úmidos, quando o milho ainda apresenta 35% de umidade, permite menor tempo de ocupação do solo pela cultura, além de resultar em um ingrediente com maior valor nutritivo para os animais.

Outra opção bastante interessante para os sistemas integrados de produção é o uso de bioinsumos, pois se espera que o ambiente que eles proporcionam contribua para a ação destes. Esse fato pode ser esperado pela maior deposição de C no ILP, no microclima mais ameno dos sistemas com o componente florestal, ou pela maior atividade e biodiversidade de organismos no solo em todos os sistemas integrados.

Por fim, também visando mais especificamente ao pecuarista, a consorciação de gramíneas e leguminosas e a suplementação estratégica dos animais podem melhorar o desempenho animal. O sistema ILPF tem sido reconhecido por sua capacidade de aumentar a produtividade e a sustentabilidade por meio da sinergia entre seus componentes. Porém, para maximizar esses benefícios e manter o ILPF na vanguarda da sustentabilidade, é necessário que as pesquisas avancem para além das espécies convencionalmente utilizadas. A introdução e o estudo de novas espécies, com diferentes funções e adaptações, contribuem para o futuro da agricultura integrada.

20.4 BEM-ESTAR ANIMAL, SERVIÇOS AMBIENTAIS E ECOSSISTÊMICOS EM SISTEMAS INTEGRADOS

Os sistemas integrados melhoram o bem-estar animal (BEA), seja pela oferta de pastagem farta em biomassa na época da seca com o pasto safrinha, ao evitar um dos piores maus-tratos que se pode fazer a um ser vivo, que é a fome, seja por melhorar o conforto térmico dos animais por causa do microclima gerado pela sombra das árvores (Figura 20.4). A redução da radiação direta sobre os animais e o microclima mais ameno proporcionado pelas árvores ficam ainda mais importantes no contexto em que as temperaturas seguem subindo e as ondas de calor (períodos de 5 dias ou mais com temperaturas 5 °C maiores do que as esperadas para a época) são cada vez mais frequentes, o que pode aumentar o diferencial de desempenho produtivo e reprodutivo em sistemas com sombra, quando comparados com animais a pleno sol. Igualmente importante,



Fotos: Juliana Priscila Sussai.

Figura 20.4. Imagem mostrando a busca dos animais por conforto térmico sob a sombra das árvores dos sistemas integrados.

não menosprezar o enriquecimento ambiental com as árvores, com as quais os animais interagem, por exemplo, ao se coçarem nelas ou comerem sua casca, ainda que, se exacerbado, isso possa reduzir o valor da madeira ou, até mesmo, sua produtividade. O BEA traz ganhos, especialmente, para animais em reprodução, melhorando a qualidade seminal dos touros (Romanello et al., 2024), elevando a qualidade embrionária (Lemes et al., 2022), auxiliando na obtenção de maiores taxas de desmama. O conforto ambiental proporcionado pela sombra é um serviço ambiental dos sistemas integrados com árvores, mas há vários outros serviços: quebra-vento, ciclagem de nutrientes, melhoria da qualidade da forragem, sequestro de carbono, fonte de alimento para abelhas, etc.

Serviços ambientais e ecossistêmicos também decorrem da maior biodiversidade presente nos sistemas silvipastoris, como ilustra a maior ocorrência, por exemplo, de insetos de interesse, como o besouro coprófago *Digitonthophagus gazella*, na produção de forragem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã e a avaliação do serviço ambiental de controle biológico por parasitoides de lepidópteras associados à árvore nativa capixingui (*Croton floribundus*).

20.5 AGRICULTURA DIGITAL E SISTEMAS INTEGRADOS

Atualmente, o uso de ferramentas de agricultura digital, como identificação eletrônica, pesagem automática, adubação em taxa variável, manejo de pastagens por imagem, etc., é quase uma exclusividade da pesquisa ou, no âmbito das propriedades rurais, circunscreve-se a algumas alternativas menos intensamente tecnológicas (por exemplo, chipagem dos animais para identificação). Sua adoção também acaba sendo restrita a uma minoria de produtores. Todavia, a constante redução de preços dos equipamentos e o aumento de opções, inclusive gratuitas, de aplicativos permitem vislumbrar uma adoção crescente das tecnologias digitais que poderão contribuir muito para uma gestão com decisões baseadas em informação de melhor qualidade, de forma mais ágil e com o aumento na eficiência do uso de insumos (exemplos: adubação em taxa variável; algoritmos para ponto ótimo de abate, etc.). O desafio é tirar todo o proveito das tecnologias digitais na propriedade e evitar que muitos dados sejam gerados, mas pouca informação seja efetivamente utilizada na gestão.

No caso dos sistemas integrados, devido à natureza deles, que requerem maior organização para serem estabelecidos e mantidos, é possível que a adoção e o aproveitamento das tecnologias de agricultura digital sejam favorecidos, especialmente quando comparados aos sistemas de produção exclusivamente pecuários. Dentre as alternativas, destacam-se as geotecnologias, com aplicações do sensoriamento remoto (orbital, aéreo e proximal) e de sistemas de informação geográfica (SIG). Por meio de técnicas de geoprocessamento e geoestatística, é possível monitorar o solo, a vegetação e o microclima, cujas informações podem ser utilizadas para otimizar o uso de recursos, promover uma produção mais rentável para o produtor e reduzir o impacto ambiental. A obtenção de imagens de satélite gratuitas ou de menor custo, e o uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) (Figura 20.5), estão também cada vez mais acessíveis. As imagens e demais informações geradas trazem uma perspectiva inédita de sua propriedade ao produtor que, então, consegue redefinir sua configuração e, dependendo do grau do investimento, monitorá-la em tempo real. Tecnologias, como o LIDAR, por exemplo, em breve permitirão a avaliação do volume de madeira em um sistema silvipastoril, ajudando a definir manejos, como desbaste ou corte, e a comprovar o sequestro de C pelo componente florestal. Os animais deste mesmo sistema poderão ter sensores de temperatura e outros que, também, ajudarão a fazer as melhores escolhas quanto ao manejo do gado e sua interação com as árvores e as pastagens.

Em relação à agricultura digital, o ponto atual ainda pode ser considerado bem inicial, especialmente na pecuária. Quando associamos a agricultura digital aos avanços da inteligência artificial (IA), é difícil prever até onde poderemos chegar e, certamente, é uma área de futuro muito promissor. A IA permite processar o volume massivo de dados (*big data*) gerados a partir da identificação eletrônica individual e associados a equipamentos, sensores, câmeras e outros dispositivos de Internet das Coisas (IoT), possibilitando identificar padrões e tendências, e a tomada de decisão em tempo real, por exemplo, sobre manejo, nutrição e saúde dos animais (Bao; Xie, 2022). Além disso, as inovações na identificação eletrônica e IA são o caminho para impulsionar a rastreabilidade no Brasil, conferindo profissionalização, transparência e competitividade global à pecuária nacional.



Foto: José Ricardo Macedo Pezzopane.

Figura 20.5. Imagem aérea feita por drone mostrando o sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) em São Carlos-SP.

20.6 OS SISTEMAS INTEGRADOS E A EMERGÊNCIA CLIMÁTICA

A emergência climática global representa um dos nossos maiores desafios civilizacionais, e há evidências recentes de aceleração do aquecimento global. Dados de agosto de 2025 (Figura 20.6) indicam que a temperatura média global já se encontra 1,31 ± 0,10 °C acima da linha de base do período pré-industrial (1850-1900), portanto, próxima ao limite superior do Acordo de Paris (1,5 °C). A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e suas variantes podem desempenhar um papel destacado como parte da solução para a emergência climática. Elas foram instrumentais na obtenção das metas do Plano ABC (Brasil, 2023), quando a meta era aumentar 4 milhões de hectares (18 a 22 milhões de t de CO_2-eq de potencial de mitigação), e eles são ainda mais relevantes em sua nova versão, o ABC+, que ampliou a meta para mais 10 milhões de hectares (38 milhões de t de CO_2-eq de potencial de mitigação) até 2030. No caso da meta do Plano ABC, ela foi superada em quase três vezes.

No documento do Plano ABC+, as justificativas para incluir o ILPF são: (1) redução dos efeitos de déficit hídrico; (2) aumenta o conforto térmico e bem-estar animal; (3) melhora a produtividade dos componentes do sistema e a utilização dos recursos naturais, especialmente solo e água, e minimiza perdas de pastagem em regiões sujeitas a inversões térmicas bruscas; (4) promove a diversificação de produtos, além de ofertar produtos madeireiros e diminuir a pressão para extração de madeira nativa; (5) estabelece corredores de interconexão entre fragmentos remanescentes de áreas de produção pecuária. Estes pontos estão mais ligados à adaptação e à resiliência dos sistemas integrados.

No que concerne à mitigação, ao avaliar o relatório da FAO intitulado “Rotas para a redução das emissões” (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023), no qual são elencadas 10 rotas, desde “mudanças na dieta da humanidade” até “manejo de resíduos animais”, fica patente que os sistemas integrados podem ter colaboração expressiva no “aumento de produtividade”, que tem o maior potencial de redução, no “sequestro de C” e na “bioeconomia circular”. Estas três, somadas, correspondem a um potencial de redução de 40% das emissões atuais na produção animal, estimadas em 6,2 Gt CO_2-eq. A redução da intensidade de emissão da produção pecuária é ainda mais importante, pois a maior parte delas decorre das emissões entéricas de metano, um gás de vida curta na atmosfera (~10 anos), o que o torna o GEE preferencial para a redução, por ter um impacto mais rápido na redução do aquecimento global. Ilustra bem o trabalho de Ocko et al. (2021), no qual a redução da temperatura, ao atingir-se o potencial de redução das emissões de metano de 2020 a 2100, seria de 0,74 °C.

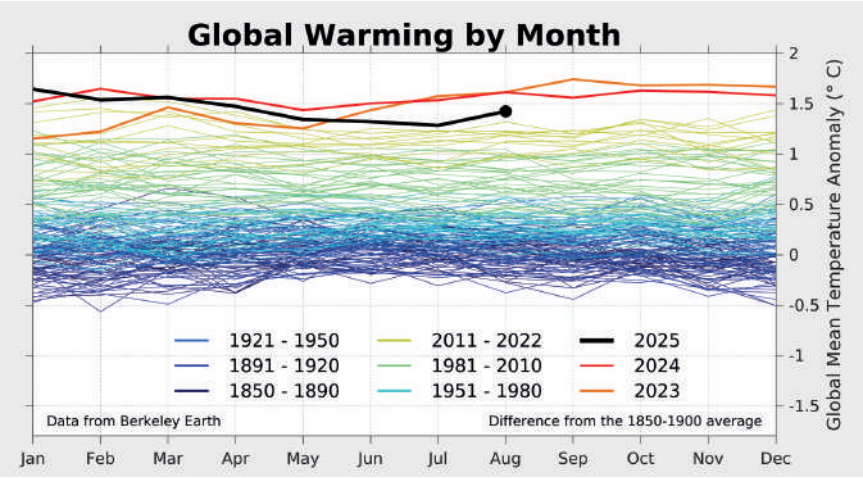


Figura 20.6. Imagem de gráfico referente à atualização do mês de agosto de 2025 na plataforma Berkeley Earth da Universidade de Berkeley, EUA.

Fonte: Berkeley Earth (2025).

20.7 SISTEMAS INTEGRADOS COMO FERRAMENTA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) não devem ser vistos apenas como uma tecnologia agrícola avançada, mas como uma plataforma estratégica para alcançar múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, o plano de ação global da FAO que reúne 17 ODS (Figura 20.7) e 169 metas, com foco nas três dimensões da sustentabilidade: economicamente viável, ambientalmente correta e socialmente justa. A natureza multifuncional dos sistemas integrados permite abordar desafios econômicos, sociais e ambientais de forma articulada.

A contribuição dos sistemas ILPF para os ODS é vasta (Figura 20.8), com destaque para:

20.7.1 ODS 1: erradicação da pobreza

A diversificação da produção em uma mesma área (grãos, carne, leite, madeira) fortalece os produtores ao diversificar a renda, garantir maior segurança alimentar e promover a resiliência diante das mudanças climáticas, fatores essenciais para superar a pobreza. Os sistemas ILPF contribuem para cumprimento das metas: 1.4 pela diversificação da produção, aumento da renda, aumento da capacidade de investimento das famílias rurais e facilitação do acesso a diferentes mercados; 1.5 pela redução da exposição e suscetibilidade das pessoas em situação de vulnerabilidade a eventos extremos relacionados ao clima e outros choques e desastres econômicos, sociais e ambientais; e 1.a contribuindo para a inclusão econômica de pequenos produtores, aumentando sua capacidade de acessar crédito rural e investir na melhoria de sua propriedade, tornando-os mais atrativos para investimentos sustentáveis e financiamentos.

20.7.2 ODS 2: fome zero

Esse ODS busca acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável. A pecuária contribui com cerca de 33% da proteína da dieta humana (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016). O ILPF contribui para várias metas, entre as quais a 2.3. Produtividade e renda de pequenos produtores permitem que o produtor obtenha três ou mais fontes de renda em uma mesma área (lavoura, pecuária e/ou floresta). Esta meta visa, até 2030, dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos. O ILPF também contribui para a meta 2.4. Sistemas de produção sustentáveis e resilientes, pois consistem em um modelo integrado que busca maximizar o uso dos recursos naturais, contribuem para a recuperação de áreas degradadas (Oliveira et al., 2024) e promovem a melhoria dos serviços ecossistêmicos (Capítulo 14).

20.7.3 ODS 6: manejo sustentável da água

Os sistemas integrados melhoram a saúde do solo, com consequente regulação do ciclo hídrico e maior



Figura 20.7. Imagens dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da FAO/ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015).

eficiência no uso da água (Barsotti et al., 2025). A recarga hídrica tende a ser mais próxima das árvores, principalmente quando a interceptação da chuva aumenta nessa posição, associada à melhoria da estrutura do solo proporcionada pelas raízes das árvores. O Capítulo 6 apresenta os resultados da melhoria das taxas de infiltração de água em solos sob sistemas integrados.

20.7.4 ODS 8: trabalho decente e crescimento econômico

Esse ODS promove o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2024). A diversificação de produtos no sistema ILPF movimenta várias cadeias produtivas e reduz a sazonalidade do emprego, oferecendo maiores oportunidades de trabalho e de meios de subsistência rurais (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018). O Capítulo 12 fez uma análise da viabilidade econômica dos sistemas integrados em comparação com os outros sistemas de produção pecuária.

20.7.5 ODS 12: produção e consumo sustentável

Esse ODS assegura padrões de produção e consumo responsáveis. O sistema ILPF promove a produção de alimentos, fibras e energia de forma sustentável e eficiente, reduzindo a dependência de insumos externos (meta 12.2), como pode ser visto nos Capítulos 7 e 8. Além disso, gera informações que apoiam a implementação de programas voltados ao consumo sustentável (meta 12.1), em consonância com os padrões internacionais de produção e consumo responsáveis (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

20.7.6 ODS 13: combate às mudanças climáticas

Esse ODS promove ações contra as mudanças climáticas. Os sistemas ILPF são reconhecidos globalmente por sua contribuição para a mitigação de gases de efeito estufa (Godara et al., 2024; Leite-Moraes et al., 2023), principalmente nos sistemas que têm o componente florestal, que aumentam o sequestro de carbono (Pezzopane et al., 2021; Oliveira et al., 2024) (Capítulos 8 e 11). Os sistemas integrados contribuem com resiliência e adaptação (meta 13.1), como também subsidiam políticas, estratégias e planejamentos para promover mitigação das emissões (meta 13.2) (Alves et al., 2017; Almeida; Alves, 2020; Nepomuceno et al., 2021), entre outras metas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

20.7.7 ODS 15: vida terrestre

Esse ODS visa proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2024). Os sistemas ILPF promovem o uso sustentável da terra por meio da

integração de atividades agrícolas numa mesma área, maximizando os serviços ambientais (meta 15.1); vem sendo utilizado para restauração de áreas degradadas e melhoria da qualidade do solo (meta 15.3); havendo o uso mais intensivo da terra, diminui-se a pressão sobre os habitats e a necessidade de conversão de novas áreas, assim como contribui com o aumento da diversificação funcional (meta 15.5); proporcionando a provisão de vários serviços num sistema viável economicamente, o que facilita a valoração dos serviços ambientais (meta 15.9) (Alves et al., 2017; Almeida; Alves, 2020; Nepomuceno et al., 2021). Resultados que auxiliam na comprovação dessas metas estão nos Capítulos 6, 7, 13 e 14 e mostram melhoria nos indicadores de saúde do solo, biodiversidade, serviços ambientais e sustentabilidade e resiliência dos sistemas integrados.

20.8 DEFINIÇÃO E MERCADO PARA CRÉDITOS DE CARBONO

A definição de créditos de carbono está associada à possibilidade de remover carbono da atmosfera, na forma de CO_2, ou de minimizar ou evitar a emissão de CO_2 e de outros gases causadores de efeito estufa, tais como o CH_4 (metano) e o N_2O (óxido nitroso).

Um crédito de carbono equivale a uma tonelada de CO_2 removido da atmosfera ou à quantidade equivalente (CO_2-eq) de outro GEE (Oldfield et al., 2022). Para

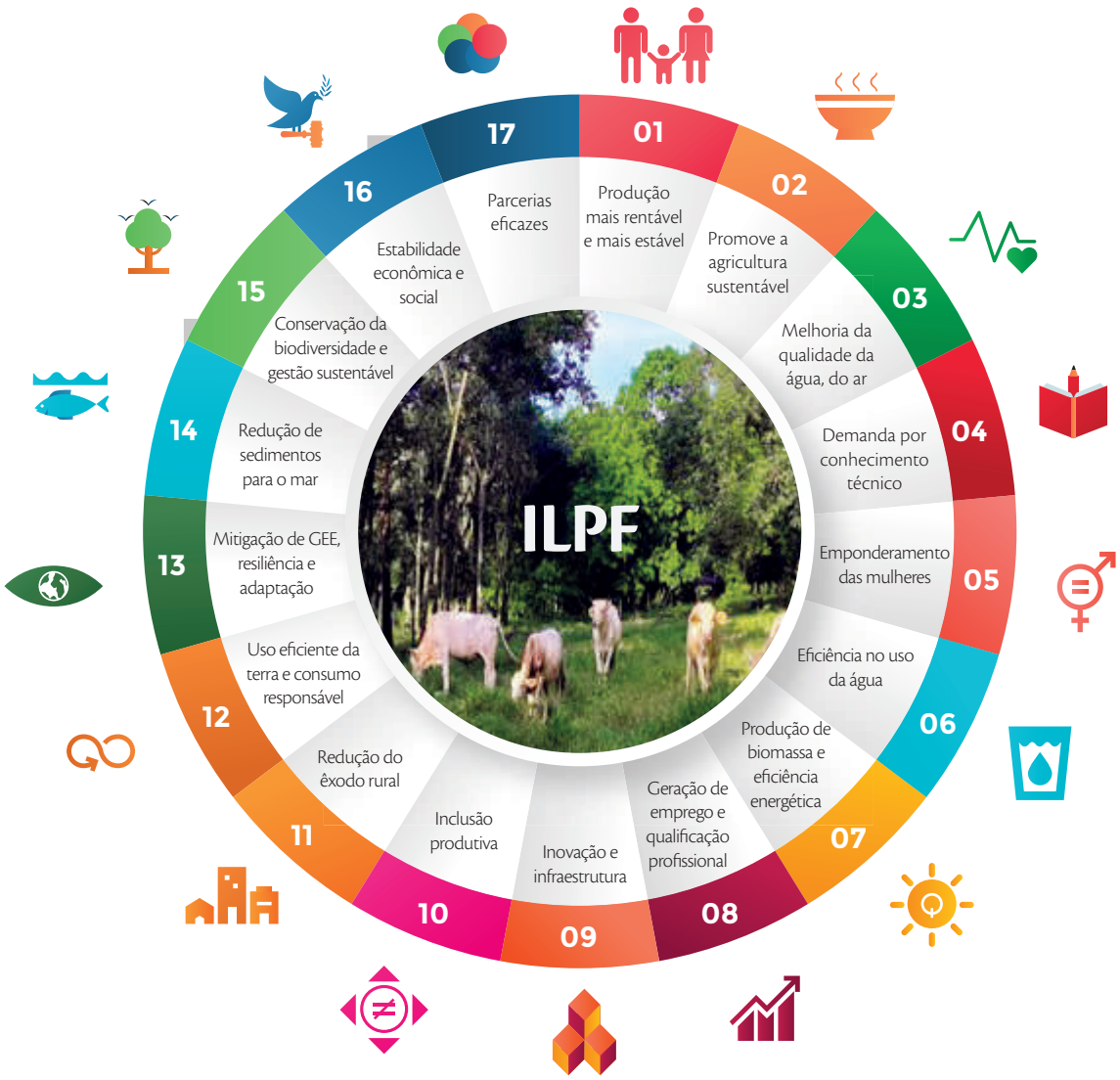


Figura 20.8. Síntese da contribuição multifacetada do sistema ILPF para os 17 ODS da Agenda 2030.

fins de comparação, o potencial de aquecimento global estimado do CH_4 e do N_2O equivale a 28 e 265 vezes, respectivamente, o efeito de uma molécula de CO_2, com efeitos ambientais que perduram por 100 anos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

A exploração do mercado de créditos de carbono permite que empresas e/ou indústrias vinculadas ao setor agropecuário sejam estimuladas a reduzir sua pegada de carbono e a tornarem-se mais sustentáveis, por meio da adoção de práticas que mitiguem as emissões de GEE. Por outro lado, empresas que, por qualquer razão, estejam impossibilitadas de reduzir suas emissões, por exemplo, devido à natureza de suas atividades, podem pagar a outros entes/agentes, como os agricultores, para que estes reduzam suas emissões ou estoquem carbono no solo. Esse processo deu origem ao que se chama de mercado voluntário de carbono, que já está em funcionamento em alguns países.

O crescimento das emissões de créditos de carbono demonstra a importância dos projetos registrados no mercado voluntário não apenas para a redução das emissões de GEE, mas também, eventualmente, para a geração de desenvolvimento socioeconômico nas comunidades locais das áreas de implementação dos projetos. A elaboração e implantação de projetos envolvem altos custos de transação, além de riscos e incertezas; assim, muitos proponentes em potencial deixam de desenvolvê-los, o que torna tais custos, riscos e incertezas barreiras ao crescimento do mercado em países em desenvolvimento (Vargas et al., 2022).

A agropecuária é uma das poucas cadeias que conseguem sequestrar carbono da atmosfera, desde que sejam adotadas boas práticas que incorporam carbono ao solo. Nesse contexto, os sistemas integrados assumem importância fundamental por serem tecnologias capazes de incrementar o teor de carbono do solo, conforme relatado em outros capítulos.

Apesar das discussões e dos esforços para regulamentar o setor, ainda não há um mercado regulado de carbono no Brasil. Entretanto, uma das medidas concretas resultantes desse processo inicial foi o Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Brasil, 2012), que visa promover a ampliação da adoção de tecnologias agropecuárias sustentáveis com alto potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A primeira fase deste Plano vigorou entre 2010 e 2020, disseminando técnicas como o plantio direto, a recuperação de pastagens degradadas, o tratamento de dejetos animais, os sistemas de ILPF, as florestas plantadas e os bioinsumos.

Apesar do potencial do Brasil para gerar benefícios financeiros efetivos por meio da geração de créditos de carbono ou de serviços ecossistêmicos, as experiências concretas ainda são limitadas. O produtor rural ainda não tem acesso a esse mercado, mesmo tendo o maior potencial sequestrador de carbono.

Para garantir o seu sucesso no longo prazo, o mercado de carbono na agricultura precisa ser baseado em dados rastreáveis, na facilidade de mensuração e em protocolos claros. Discrepâncias entre esses protocolos podem resultar na criação de processos de quantificação de créditos não equivalentes, os quais poderiam minar a confiança na integridade dos programas de pagamentos por meio desses créditos (Oldfield et al., 2022).

Uma vez sequestrado, o carbono permanecerá no solo enquanto as práticas de manejo sustentáveis responsáveis pelo seu sequestro continuarem a ser adotadas (Lal, 2004). Aqui vale lembrar os programas de baixo carbono e carbono neutro da Embrapa (carne, bezerro, couro, leite, soja, trigo, milho, sorgo e outros), que têm em seu cerne as boas práticas agropecuárias para a manutenção ou o aumento do C no solo e que, associados às calculadoras de carbono, poderão ser um caminho para a implementação de programas de crédito de carbono.

A importância das boas práticas é evidente, pois o processo de sequestro de carbono também é reversível, e quando essas práticas são descontinuadas, o carbono estocado pode ser perdido novamente para a atmosfera na forma de CO_2. Especialmente, os sistemas integrados apresentam vantagens distintas em relação a outras tecnologias, devido aos ganhos a longo prazo e à estabilidade dos próprios sistemas.

Segundo Assad et al. (2021), uma vez que o sistema de integração contém componentes forrageiros e florestais, tem potencial para contribuir para a retenção de carbono no solo e na biomassa, bem como para a redução das emissões de GEE. Adicionalmente, em sistemas de ILPF, parte do CO_2 removido poderá auxiliar na redução de emissões em outros setores além da agricultura, se a madeira for comercializada para o mercado de móveis ou para a geração de energia, por exemplo.

20.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O maior desafio para o futuro ainda é escalar as soluções que já se provaram eficazes e as que seguimos

criando. Políticas públicas de incentivo podem ser muito importantes para a superação de desafios pontuais na adoção de práticas de intensificação sustentável. Um exemplo é a suplementação estratégica, que requer uma quantidade de cochos que costuma ser pelo menos o dobro da suplementação convencional, o que gera um investimento inicial difícil de ser absorvido pela maioria dos produtores, mas cujos benefícios financeiros, na maioria das vezes, são capazes de cobrir o investimento. Assim, mecanismos financeiros estimulados por políticas públicas, junto com assistência técnica qualificada, podem fazer grande diferença. Outro exemplo seria a existência de modelos de negócio que ajudem a superar barreiras, como o fluxo de caixa desafiador do componente florestal, o que favoreceria sua adoção. Apesar de já haver o modelo em que empresas dependentes de madeira como matéria-prima fazem parcerias com o fornecedor, a entrada de novos atores nesse circuito, como os governos e o sistema financeiro, podem facilitar a tomada de decisão pelo produtor, cujos benefícios ambientais e maior produtividade trariam vantagem para toda a sociedade, inclusive pela geração de renda e emprego, o que também causa aumento de arrecadação tributária, eventualmente compensando totalmente o investimento com recursos públicos.

Ao focar na promoção de sistemas multifuncionais, como o ILPF, a agropecuária brasileira ganha impulso para se consolidar não apenas como uma potência na produção de alimentos, mas também como uma vanguarda global em soluções baseadas na natureza, demonstrando que é possível dissociar o crescimento da produção agropecuária do aumento das emissões e da degradação ambiental.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. G.; ALVES, F. V. **Diretrizes técnicas para produção de carne com baixa emissão de carbono certificada em pastagens tropicais**: Carne Baixo Carbono (CBC). Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2020. 36 p.

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A. **Carbon Neutral Brazilian Beef**: a new concept for sustainable beef production in the tropics. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 28 p.

ASSAD, E. D.; ESTEVAM, C. G.; LIMA, C. Z.; PAVÃO, E. M.; PINTO, T. P. **Potencial de mitigação de gases de efeito estufa das ações de descarbonização da pecuária até 2030**. São Paulo: Escola de Economia de São Paulo; Fundação Getúlio Vargas, 2021. (Observatório de Bioeconomia).

BAO, J.; XIE, Q. Artificial intelligence in animal farming: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129956, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129956.

BARSOTTI, M. P.; ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; GOMES, R. C.; PALHARES, J. C. P.; MAZZETTO, A.; DICKHOEFER, U. A pathway for decreasing the water footprint from grazing based beef production systems in the Tropics. **Agricultural Systems**, v. 222, n. 104192, 2025.

BERKELEY EARTH. **August 2025 Temperature Update**. 2025. Disponível em: https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/?mc_cid=23a87ea604&mc_eid=3ebc0f778f. Acesso em: 19 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo. **Plano ABC**: dez anos de sucesso e uma nova forma sustentável de produção agropecuária. Brasília: MAPA/SDI, 2023.

CARVALHO, T. A.; CARAMALAC, L. S.; OLIVEIRA, L. O. F. Performance and productivity of beef cattle in off-season pasture. In: Proceedings of the II World Congress on integrated crop-livestock-forestry systems. Brasília-DF, 2021.

CARVALHO, P. C. F.; RIBEIRO FILHO, H. M. N.; POLI, C. H. E. C.; MORAES, A.; DELAGARDE, R. Importância da estrutura da pastagem na ingestão e na seleção de dietas pelo animal em pastejo. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38., 2001, Piracicaba. **Anais** [...]. Piracicaba: SBZ, 2001. p. 853-871.

COSTA, R. M.; COSTA, M. K. L.; ROCHA, S. M. B.; LEITE, M. R. L.; ALCANTARA NETO, F.; DE SOUZA, H. A.; PEREIRA, A. P. A.; MELO, V. M. M.; MEDEIROS, E. V.; MENDES, L. W.; ARAUJO, A. S. F. Soil management shapes bacterial and archaeal communities in soybean rhizosphere: Comparison of no-tillage and integrated crop-livestock systems. **Rhizosphere**, v. 30, p. 100886, 2024a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100886.

COSTA, R. M.; ROCHA, S. M. B.; VENTURA, S. H.; DE AVIZ, R. O.; LEITE, M. R. L.; DE SOUZA, H. A.; DE ALCANTARA NETO, F.; DE MEDEIROS, E. V.; PEREIRA, A. P. A.; MENDES, L. W.; ARAÚJO, A. S. F. Differential recruitment of plant growth-promoting bacteria community by soybean rhizosphere in no-tillage and integrated crop-livestock. **Rhizosphere**, v. 31, p. 100948, 2024b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100948.

EMBRAPA. **Sistema Antecipe**. 2025a. Disponível em: https://www.embrapa.br/sistema-antecipe. Acesso em: 19 set. 2025.

EMBRAPA. **Sistema Antecipasto**. 2025b. Disponível em: https://www.embrapa.br/agropecuaria-oeste/antecipasto. Acesso em: 19 set. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Synthesis – Livestock and the sustainable development goals global agenda for sustainable livestock**. Rome: FAO, 2016. Disponível em: http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res_livestock/docs/2016/Panama/FAO-AGAL_synthesis_Panama_Livestock_and_SDGs.pdf. Acesso em: 19 set. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Transforming the livestock sector through the Sustainable Development Goals**. Rome: FAO, 2018. 222 p. (World Livestock). DOI: http://doi.org/10.4060/ca1201en.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Pathways towards lower emissions**: a global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome: FAO, 2023. DOI: http://doi.org/10.4060/cc9029en.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; CONTE, O. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1131-1138, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200002.

FUNNICELLI, M. I. G.; LIMA, N. S. M.; SARTINI, C. C. F.; LEMOS, E. G. M.; ARAUJO NETO, R. B.; SOUZA, H. A.; OLIVEIRA JUNIOR, J. O. L.; SAGRILO, E.; BLANCO, F. F.; ANDRADE, H. A. F.; SOUSA, D. C.; SILVA, M. L. N.; LEITE, L. F. C.; LIMA, P. S. C.; PINHEIRO, D. G. Revealing the Bacteriome in Crop-Livestock-Forest Integration Systems in the Cerrado of MATOPIBA, Brazil. **Forests**, v. 16, n. 4, p. 626, 2025. https://doi.org/10.3390/f16040626.

GODARA, A. S.; SARESH, N. V.; BIJARNIA, A. L.; GODARA, R. S.; KUMAR, D.; MEENA, D.; KUMAR, M. Integrating Livestock with Crops and Forestry for Sustainability. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, n. 11, p. 83-90, 2024. DOI: http://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i114530.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014**: synthesis report. Geneva: IPCC, 2014. 151 p..

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: IPEA, 2024. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/. Acesso em: 19 set. 2025.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, 304, 11, 2004.

LEMES, A.; FONTES, P. K.; NOGUEIRA, M. F. G.; WATANABE, Y. F.; GARCIA, A. R.; GIMENES, L. U. Environmental conditions can modulate the gene expression of embryo from primiparous beef cows. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL EMBRYO TECHNOLOGY SOCIETY, 48., 2022, Savannah. **Proceedings** [...]. Champaign: IETS, 2022. v. 34, p. 272.

LEITE-MORAES, A. E.; ROSSATO, F. G.; SUSAETA, A.; BINOTTO, E.; MALAFAIA, G. C.; DE AZEVEDO, D. B. Environmental impacts in integrated production systems: overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 420, p. 138400, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138400.

NEPOMUCENO, A. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; RUFINO, C. F. G.; DEBIASI, H.; NOGUEIRA, M. A.; FRANCHINI, J. C.; ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; BUNGENSTAB, D. J.; DALLAGNOL, V. F. **LCS Program – Low Carbon Soybean**: a new concept of sustainable soybean. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2021. (Embrapa Soja. Comunicado Técnico, 101).

OCKO, I. B.; SUN, T.; SHINDELL, D.; OPPENHEIMER, M.; HRISTOV, A. N.; PACALA, S. W.; MAUZERALL, D. L.; XU, Y.; HAMBURG, S. P. Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 5, p. 054042, 2021. DOI: http://doi.org/10.1088/1748-9326/abf9c8.

OLDFIELD, E. E.; EAGLE, A. J.; RUBIN, R. L.; RUDEK, J.; SANDERMAN, J.; GORDON, D. R. Crediting agricultural soil carbon sequestration: Regional consistency is necessary for carbon credit integrity. **Science**, v. 375, n. 6586, p. 1222-1225, 2022. DOI: http://doi.org/10.1126/science.abl7991.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic Forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, n. 127219, p. 127219, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel. Acesso em: 18 set. 2025.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; DE CAMPOS BERNARDI, A. C.; MULLER, M. D.; DE OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. **Agroforestry Systems**, v. 98, p. 2013-2025, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-024-01038-y.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. D.; RODRIGUES, R. D. A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G. D.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 12, p. 3457-3468, 2021. DOI: http://doi.org/10.1002/ldr.3876.

ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; DE CARVALHO BALIEIRO, J. C.; BRANDÃO, F. Z.; DE ANDRADE, A. F. C.; ZAPPATERRA, M.; GARCIA, A. R. Effect of access to natural shade on scrotal thermoregulatory capacity, integrity of the testicular parenchyma and sperm morphology of Nelore (Bos indicus) and Canchim (Bos taurus x Bos indicus) bulls. **International**

Journal of Biometeorology, v. 68, n. 11, p. 1, 2024. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-024-02759-6.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 198).

SOUSA, D. M. G.; VILELA, L.; REIN, T. A.; LOBATO, E. Eficiência da adubação fosfatada em dois sistemas de cultivo em um latossolo de Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 1 CD-ROM.

VARGAS, D. B.; DELAZERI, L. M. M.; FERREIRA, V. H. P. **Mercado de carbono voluntário no Brasil**: na realidade e na prática. São Paulo: Escola de Economia de São Paulo; Fundação Getúlio Vargas, 2022. (Observatório de Bioeconomia).

VERRA. **Verra sets the world's leading standards for climate action**. 2025. Disponível em: https://verra.org/. Acesso em: 19 set. 2025.

A agropecuária brasileira vive um momento de transformação, e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) surge como um dos pilares dessa mudança. Esta obra detalha duas décadas de pesquisa lideradas pela Embrapa Pecuária Sudeste, oferecendo uma visão técnica e científica sobre um sistema de produção agropecuária moderno, adotado em mais de 17 milhões de hectares no Brasil.

O livro mostra como a combinação sinérgica de culturas agrícolas, produção animal e o componente florestal pode elevar a produtividade e, ao mesmo tempo, promover a regeneração do meio ambiente.

Ao longo dos capítulos, o leitor descobrirá os múltiplos benefícios da ILPF, desde a recuperação de solos degradados e o sequestro de carbono até o aumento significativo no bem-estar animal.

A criação de um microclima mais ameno e o enriquecimento ambiental proporcionado pelas árvores, possibilitam que os animais expressem melhor seu potencial produtivo, resultando em ganhos que conciliam bem-estar e eficiência.

Além disso, a obra mergulha na fronteira tecnológica, apresentando o uso de sensores, drones, geotecnologias e inteligência artificial que transformam o campo em um ecossistema inteligente e resiliente às mudanças climáticas.

A viabilidade econômica e a sustentabilidade são analisadas, comparando sistemas convencionais com arranjos integrados e destacando oportunidades como o protocolo de produção da Carne Carbono Neutro.

Barreiras como custos de implantação e riscos climáticos são discutidas à luz de políticas públicas e estratégias de transferência de tecnologia essenciais para o produtor rural.

Esta obra é um guia indispensável para entender como a ciência e a prática se unem para consolidar o Brasil como referência global em agropecuária sustentável. Por meio da modelagem de dados e indicadores de sustentabilidade, a obra revela o caminho para uma produção intensiva, resiliente e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Ao percorrer os capítulos, o leitor descobrirá como a ciência, a inovação tecnológica e o manejo estratégico podem transformar propriedades rurais em modelos de eficiência e biodiversidade para o futuro das próximas gerações.

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

editora cubo
soluções para o universo acadêmico

Embrapa

Patrocinadores Diamante

JOHN DEERE

redeILPF

Patrocinador Ouro

syngenta

9 786586 819427