

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*

**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**

editora  cubo  
soluções para o universo acadêmico

 Embrapa

**Apoio**

 JOHN DEERE

 redeLUPF

 syngenta

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.

# 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 Agroecossistemas),  
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 Penteadó 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 Januszkiewicz**

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 Agrônômicas 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), Curitiba/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 Anção 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.

**Salette 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.

# Solos

Alberto Carlos de Campos Bernardi, Amanda Maria Tadini, Wanderlei Bieluczyk, Gustavo Pereira Valani, Patrícia Perondi Anção 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

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 agri-

cultura 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, conseqüentemente, 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 <sub>2</sub>	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 <sup>-3</sup> )	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 <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )		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 <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	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 ( $CTC \geq 75 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) para todos os pontos amostrais, provavelmente devido ao efeito da calagem superficial e da MOS (Figura 6.1c). O atributo pH ( $\text{CaCl}_2$ ) 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)

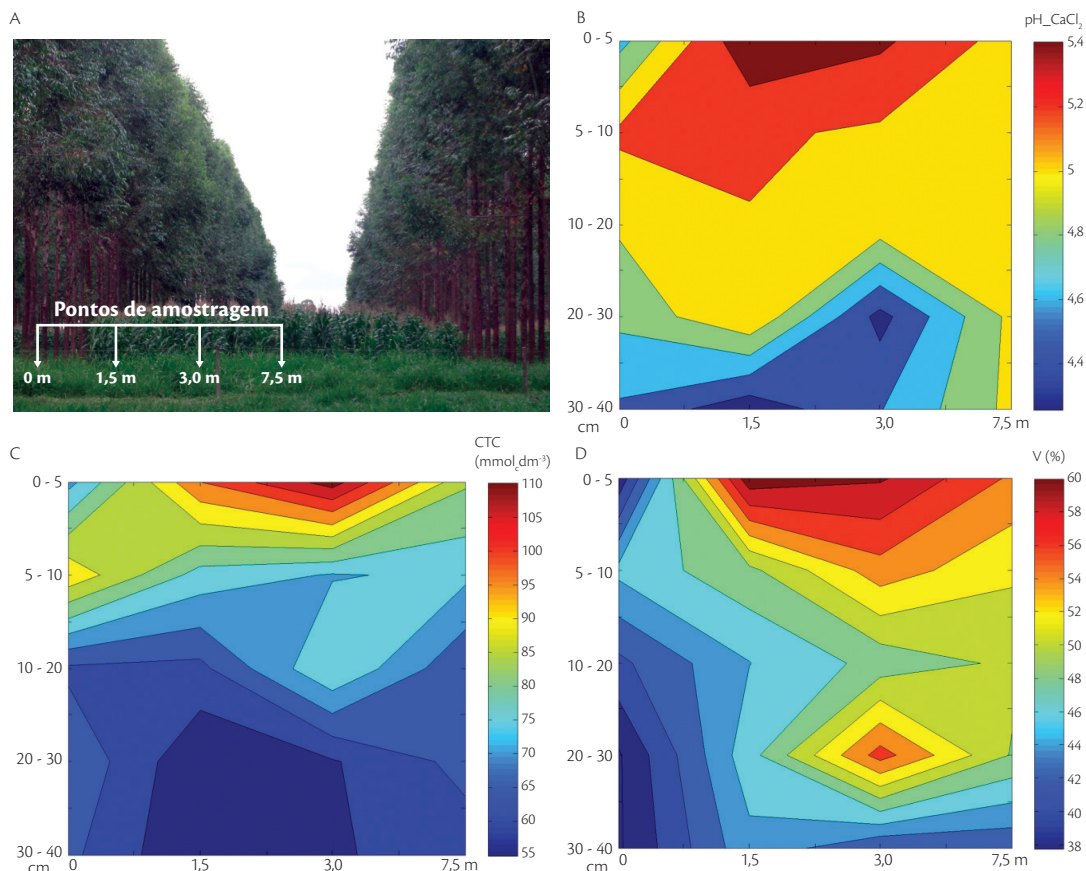
O solo atua como um importante reservatório de carbono na forma de matéria orgânica. A quantidade de carbono orgânico (COS) armazenada no solo é aproximadamente o dobro do carbono presente na atmosfera, e entre duas e três vezes superior ao volume de carbono encontrado nos organismos vivos de todos os 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.

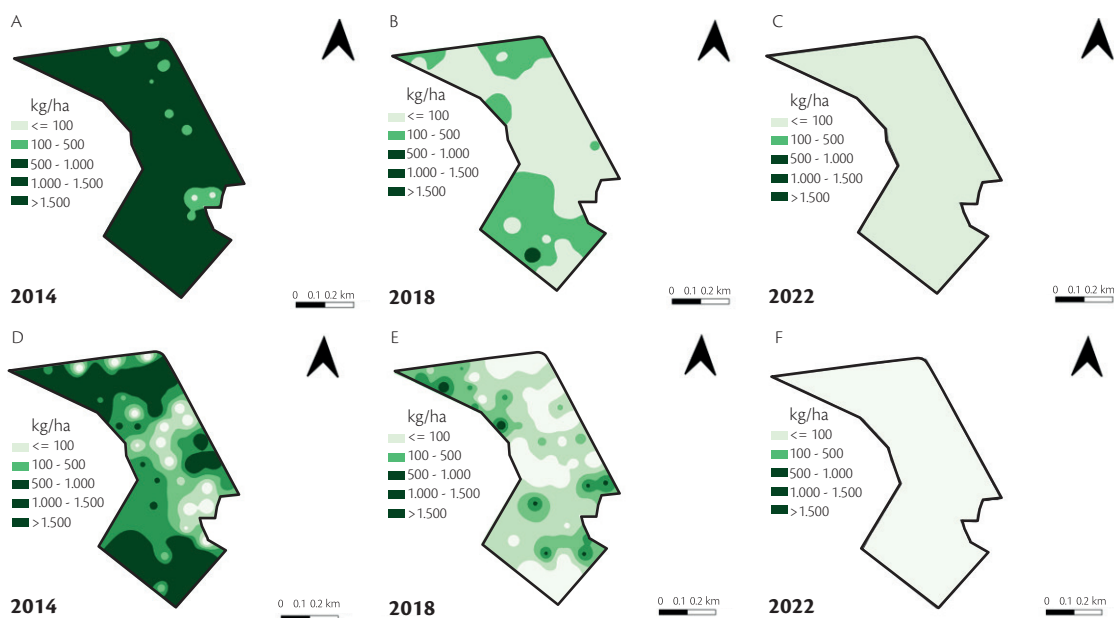
Solos sob sistemas ILPF têm o potencial de capturar e sequestrar carbono, e de aumentar a quantidade de MOS, contribuindo na mitigação das emissões de gases causadores do efeito estufa na agricultura. Dessa forma, solos sob ILPF proporcionam serviços ambientais como sequestro de carbono, ciclagem de 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, conseqüentemente, 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

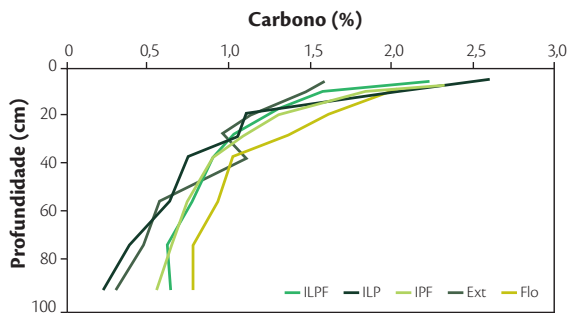


**Figura 6.1.** Pontos de amostragem em relação ao renque de árvores, e variabilidade espacial e em profundidade dos parâmetros de fertilidade (A); pH ( $\text{CaCl}_2$ ) (B); capacidade de troca catiônica (CTC) (C); e saturação por bases (V%) do sistema integração lavoura-pecuária-floresta-corte (ILPF-Corte) (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  $^{13}\text{C}$ , os autores evidenciaram que esse acúmulo foi devido à adição de material orgânico proveniente de plantas  $\text{C}_3$  (arbóreas), evidenciada pela depleção nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$ .

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,

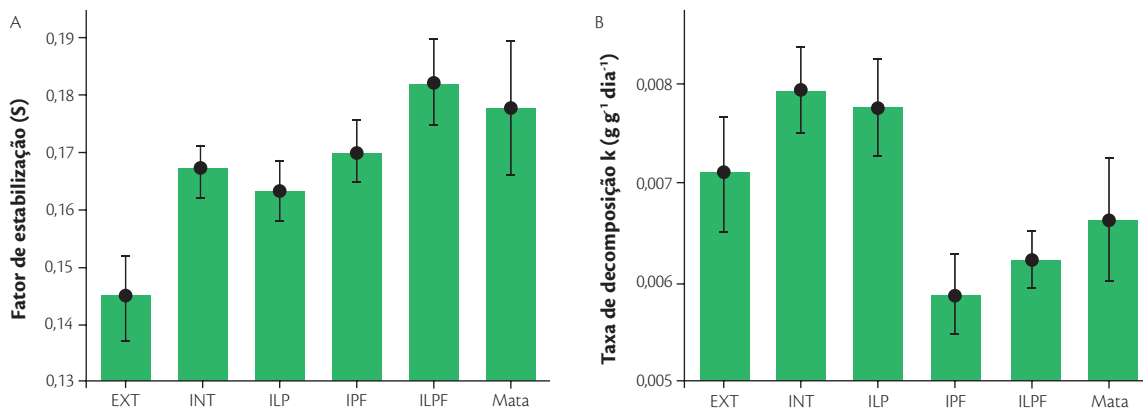
aumentam o estoque de C e elevam sua biorreatividade (Tadini et al., 2022a, 2022b, 2022c).

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 conseqüentemente 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).

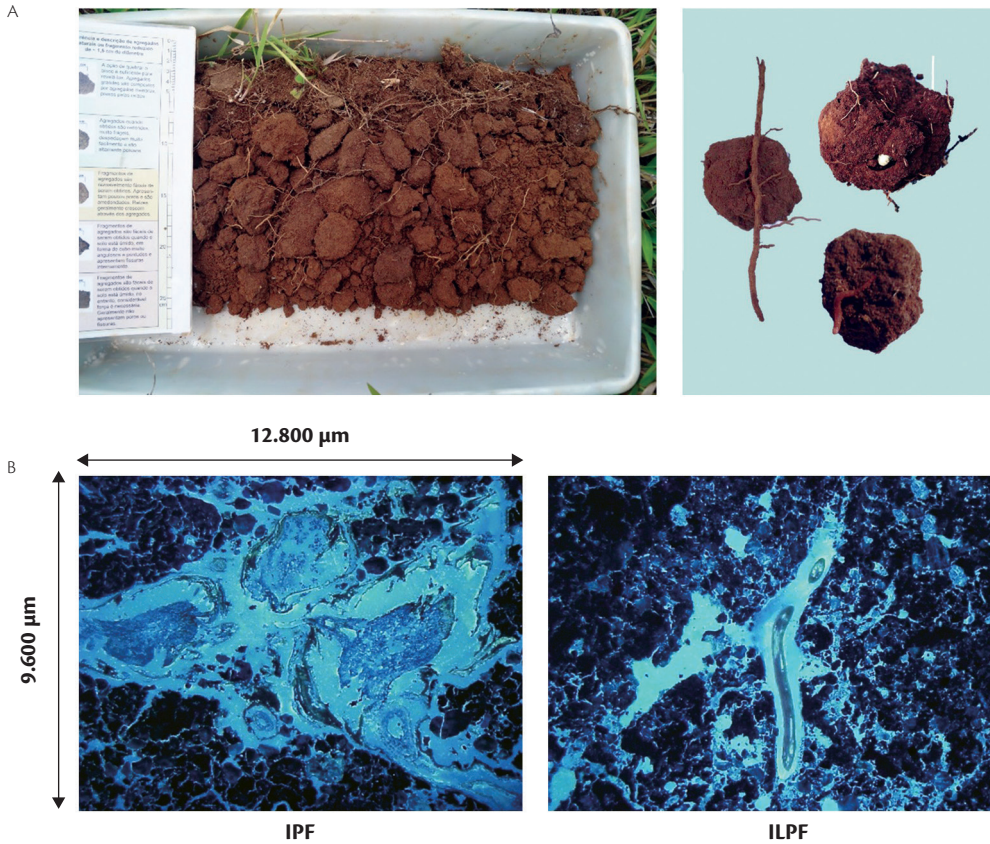
qualidade e para o êxito das atividades agrícolas. Essas características influenciam de forma direta a disponibilidade de água e nutrientes às plantas, o crescimento e aprofundamento das raízes, a aeração adequada e a resistência à erosão. A análise criteriosa desses atri-

butos 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.

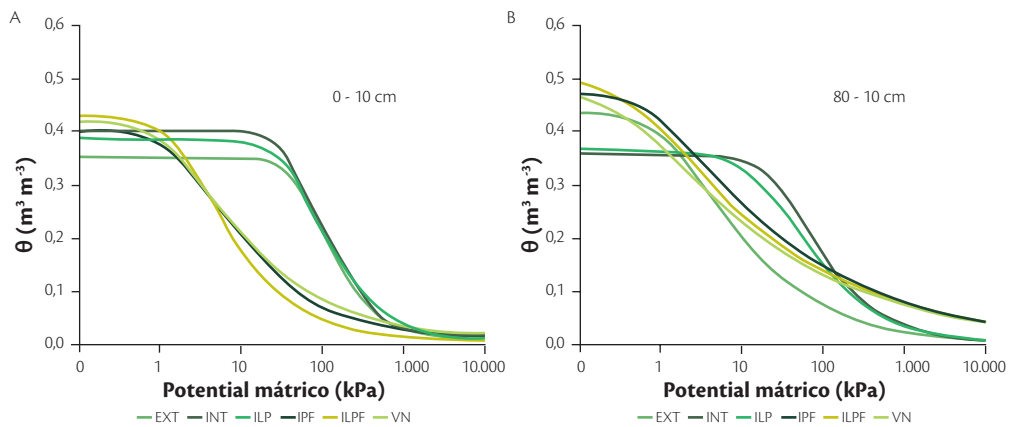
Ainda há poucos resultados sobre as propriedades físicas de solos em sistemas ILPF e são pouco conclusivos (Valani et al., 2020; Oliveira et al., 2024a). Sistemas de ILPF podem, por exemplo, aumentar (Fernandes et al., 2016) ou diminuir (Assis et al., 2015) a densidade do solo. Anghinoni et al. (2013) 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 macroscópica (agregados com raízes, minhocas e macrofauna edáfica) (A) e microscópica (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 manu-

tenção de resíduos vegetais cobrindo o solo, todas elas contribuindo para a melhor conservação do solo como recurso natural.

### 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.,

**Tabela 6.2.** Médias  $\pm$  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.

	<b>Ksat (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>DS (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>RP (MPa)</b>	<b>COT (dag kg<sup>-1</sup>)</b>
EXT	17,54 $\pm$ 1,77 c	1,49 $\pm$ 0,01 b	2,87 $\pm$ 0,34 a	1,95 $\pm$ 0,04 b
INT	18,79 $\pm$ 2,93 c	1,44 $\pm$ 0,06 b	3,16 $\pm$ 0,67 a	2,13 $\pm$ 0,09 ab
ILP	23,02 $\pm$ 1,34 c	1,48 $\pm$ 0,02 b	3,10 $\pm$ 0,29 a	2,10 $\pm$ 0,13 ab
IPF	44,63 $\pm$ 6,48 b	1,47 $\pm$ 0,02 b	3,52 $\pm$ 0,45 a	2,07 $\pm$ 0,04 ab
ILPF	69,25 $\pm$ 10,58 b	1,56 $\pm$ 0,02 b	3,47 $\pm$ 0,49 a	2,38 $\pm$ 0,06 a
VN	313,97 $\pm$ 55,48 a	1,17 $\pm$ 0,06 a	0,94 $\pm$ 0,22 b	2,15 $\pm$ 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).

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 (Kuz'yakov; 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 minirrhizotrons 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  $\beta$ -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 (saprófitos), 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.

- **Nematóides:** 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 líquens e serapilheira. São essenciais para a cadeia alimentar da microfauna e microrganismos, sendo predadores de bactérias, amebas e, no caso dos tardígrados, nematóides.

**Mesofauna:** são animais com tamanho entre 0,2 mm e 4 mm, visíveis com o auxílio de uma lupa.

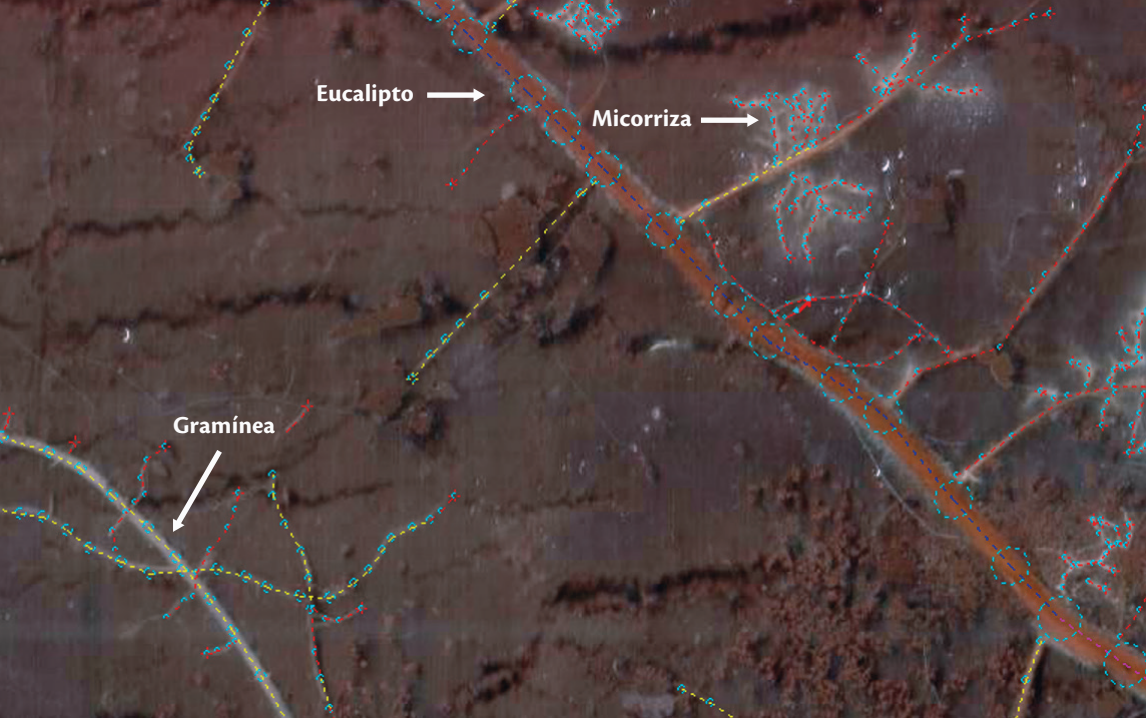
- **Colêmbolos:** são provavelmente o grupo de hexápodes mais abundante na Terra e têm alta diversidade, alimentam-se de fungos, bactérias e matéria orgânica em decomposição, encontrados principalmente no solo e serapilheira. Sua presença é um bom indicativo da saúde do solo.
- **Ácaros:** colonizam 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 (Oligochaeta 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); epígeas (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), gongólos (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  $15 \times 2$  m para  $15 \times 4$  m. Essa inter-

venção 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<sub>2</sub>, 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, celulasas 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  $\beta$ -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  $\beta$ -glicosidase, e sobretudo, aminopeptidase, tiveram maior atividade na linha de eucalipto, enquanto a fenoxidase tem maior atividade nas entrelinhas de eucalipto, onde há maior abundância de gramíneas. Em avaliação da atividade enzimática de arilsulfatase

e  $\beta$ -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).

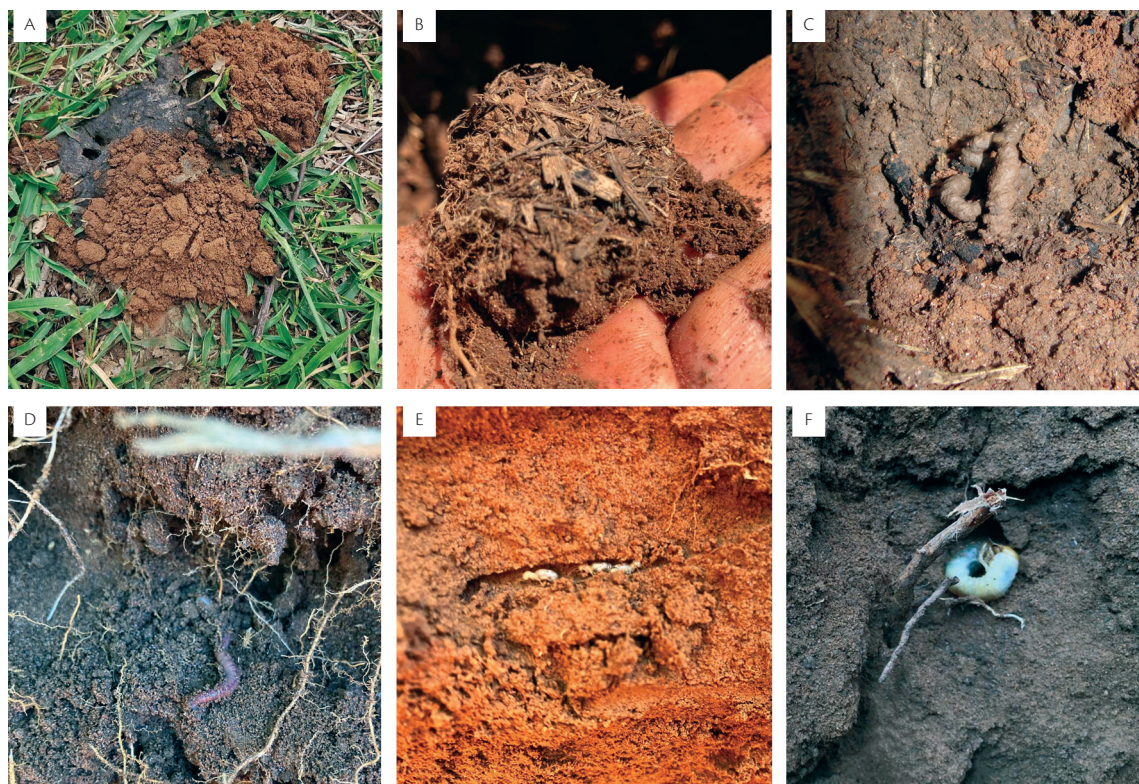
Franco et al. (2020) também verificaram melhoria na atividade enzimática em áreas de manejo integrado, comparadas a áreas de pastagem com uma única espécie. No início da implantação dos sistemas, ainda não houve resposta da biomassa e respiração microbiana de acordo com o manejo, mas as variações na 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.

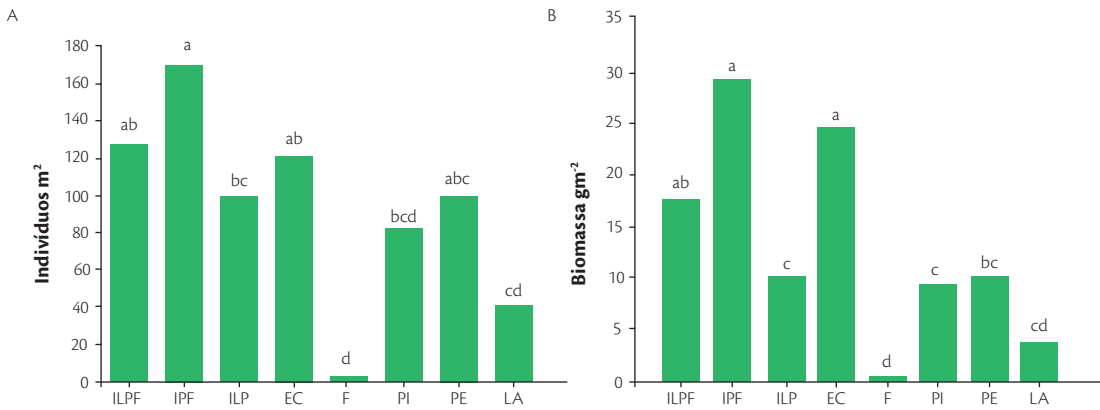
Diferentes arquiteturas radiculares e a presença da fauna do solo (minhocas, microrganismos) melhoram a aeração, a infiltração de água e a resiliência do solo

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-



**Figura 6.8.** Registros da atividade biológica nos solos sob sistemas integrados na Embrapa Pecuária Sudeste.



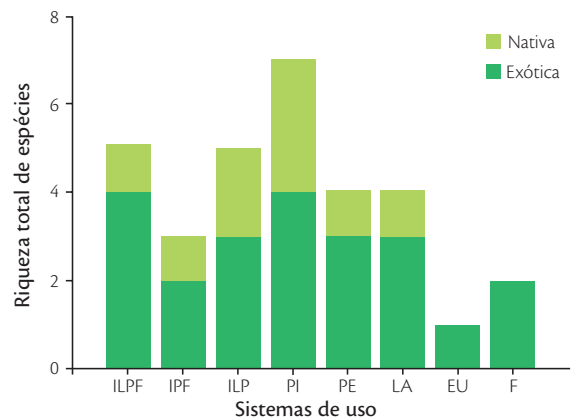
**Figura 6.9.** Abundância (ind m<sup>-2</sup>) (A) e biomassa (g m<sup>-2</sup>) (B) de minhocas em diferentes sistemas de produção (integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), integração pecuária-floresta (IPF), integração lavoura-pecuária (ILP), pastagem intensiva (PI), pastagem extensiva (PE), lavoura 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.

### 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 bioló-



**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.

gicos. 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 subtropico 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.; EISENHAEUER, 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](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.; LABARRÈRE, 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](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](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](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.; CAMPRESI, 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.; CONTRADO, 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](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.; KUZUYAKOV, Y.; REVILLINI, D.; SONNE, C.; XIA, C.; RUAN, H.; LIU, Y.; FULLIANG, 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.; FACCIÓ-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>.
- SETÁLÁ, 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>.