



Indicadores de qualidade do solo em sistemas de produção de erva-mate sombreado, integrado e sob pleno sol: estudo de caso em Bituruna, PR



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 383

Indicadores de qualidade do solo em sistemas de produção de erva-mate sombreado, integrado e sob pleno sol: estudo de caso em Bituruna, PR

*Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto
Krisle da Silva
Talita Ferreira
Lucilia Maria Parron
Isabella Blagiem de Campos
Neyde Fabiola Alarezo Giarola
Alisson Marcos Fogaça
Ariane Lentice de Paula
Kauanna Brock Ferreira Pepe
Wilian Carlo Demetrio
Regiane Kazmierczak Becker
Lilianne dos Santos Maia Bruz
Alessandra Santos
José Nivaldo de Oliveira Sátiro
George Gardner Brown
André Eduardo Biscaia de Lacerda*

Embrapa Florestas
Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba,
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR, Brasil
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da
Embrapa Florestas

Presidente
Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-Presidente
José Elidney Pinto Júnior

Secretária-Executiva
Neide Makiko Furukawa

Membros
Annete Bonnet
Cristiane Aparecida Fioravante Reis
Elenice Fritzsons
Krisle da Silva
Marcelo Francia Arco Verde
Marilice Cordeiro Garrastazu
Susete do Rocio Chiarello Penteado
Valderês Aparecida de Sousa

Supervisão editorial e revisão de texto
José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica
Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Luciane Cristine Jaques

Foto capa
Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto

1ª edição

Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Florestas

Indicadores de qualidade do solo em sistemas de produção de erva-mate sombreado,
integrado e sob pleno sol: estudo de caso em Bituruna, PR. / Ricardo Trippia dos
Guimarães Peixoto ... [et al.] – Colombo : Embrapa Florestas, 2022.
55 p. (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; n. 383).

1. Manejo do solo. 2. Qualidade. 3. Sistema de produção. 4. Mate. 5. *Ilex*
Paraguariensis. 6. Erva-mate. I. Peixoto, Ricardo Trippia dos Guimarães. II. Silva, Krisle.
III. Ferreira, Talita. IV. Parron, Lucília Maria. V. Campos, Isabella Blagiem de. VI. Giarola,
Neyde Fabiola Alarezo. VII. Fogaça, Alisson Marcos. VIII. Paula, Ariane Lentice de. IX.
Pepe, Kauanna Brock Ferreira. X. Demetrio, Wilian Carlo. XI. Bruz, Lilianne dos Santos
Maia. XII. Santos, Alessandra. XIII. Sátiro, José Nivaldo de Oliveira. XIV. Brown, George
Gardner. XV. Lacerda, André Eduardo Biscaia de. XVI. Série.

CDD: 631.8 (21. ed.)

Autores

Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto

Engenheiro-agrônomo, PhD em Soil Science, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

Krisle da Silva

Engenheira-agrônoma, doutora em Microbiologia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR.

Talita Ferreira

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pós-doutoranda em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

Lucilia Maria Parron

Bióloga, pós-doutora no Scotland's Rural College (Reino Unido), pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR.

Isabella Blagiem de Campos

Bióloga, mestranda em Ciências (Bioquímica) da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

Neyde Fabiola Alarezo Giarola

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), professora da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR.

Alisson Marcos Fogaça

Engenheiro-agrônomo, mestre em Ciências Agrárias (Agronomia), doutorando em Ciências do Solo e Recursos Ambientais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR.

Ariane Lentice de Paula

Engenheira-agrônoma, doutorado em Ciências Agrárias (Agronomia), pós-doutoranda em Ciências Agrárias (Agronomia) da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR.

Kauanna Brock Ferreira Pepe

Engenheira-agrônoma e Engenheira-ambiental, engenheira da Lantana Assessoria Ambiental e Agrônômica, Curitiba, PR.

Wilian Carlo Demetrio

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pós-doutorando em Ecohidrologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP.

Regiane Kazmierczak Becker

Engenheira-agrônoma, mestre em Ciências Agrárias (Agronomia), professora da Universidade Anhanguera, Ponta Grossa, PR.

Lilianne dos Santos Maia Bruz

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, bolsista voluntária da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Alessandra Santos

Bióloga, mestre em Ciência do Solo, doutoranda em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

José Nivaldo de Oliveira Sátiro

Engenheiro-agrônomo, mestre em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

George Gardner Brown

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ecologia do Solo, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR.

André Eduardo Biscaia de Lacerda

Engenheiro florestal, doutor em Physical Geography, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR.

Apresentação

O Brasil é um dos maiores produtores de commodities do mundo (OECD/FAO, 2021). Contudo, conciliar a produção agrícola, incluindo a silvicultura e a pecuária, com a conservação e valorização do capital natural e social na paisagem rural ainda é um desafio. Assim, é função da pesquisa avaliar os impactos de sistemas de produção agrícola, incluindo os sistemas integrados e os sistemas agroflorestais, no sentido de mensurar a provisão e manutenção dos serviços ecossistêmicos relacionados ao solo e à água na paisagem rural, bem como seu potencial de agregação de valor e contribuição para a melhoria da qualidade de vida da sociedade. Sobretudo, os resultados da pesquisa visam a proposição de métodos e tecnologias, incluindo a definição de indicadores, capazes de certificar a produção agrícola, assim como avançar no uso de instrumentos político-econômicos de incentivo a práticas de manejo de recursos naturais com foco na provisão e manutenção desses serviços.

A agricultura também é um elemento fundamental para o alcance de diversos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), como a erradicação da pobreza (ODS1), fome zero e agricultura sustentável (ODS2), água limpa e saneamento (ODS6), trabalho decente e crescimento econômico (ODS8), consumo e produção responsáveis (ODS12), mitigação e adaptação às mudanças climáticas (ODS13) e vida terrestre, incluindo a proteção da biodiversidade (ODS15). O protagonismo da agenda brasileira na implementação dos ODS inclui gerar resultados e soluções inovadoras na conservação e restauração dos biomas nacionais e manutenção das populações locais.

Os sistemas de produção de erva-mate sombreado, integrados a fragmentos da Floresta Ombrófila Mista Montana têm sido reconhecidos pela sua contribuição na provisão de serviços ecossistêmicos, principalmente na conservação da biodiversidade, conservação do solo e água, mitigação e adaptação às mudanças climáticas pelo sequestro de gases de efeito estufa associados ao uso sustentável da terra e diversificação da produção de alimentos. Nesse contexto, esse documento apresenta um estudo de caso na região de Bituruna, no sudoeste do Estado do Paraná, desenvolvido em propriedades de agricultores familiares, onde foram avaliados vários atributos de solos. Com os resultados obtidos foi possível definir quais atributos foram os mais eficientes como indicadores para avaliar a qualidade daqueles solos. Na perspectiva dos ODS, o documento contribui especialmente para os objetivos 2, 6, 13 e 15. O estudo destaca a importância de modelos de agricultura sustentável (ODS2), e de ações de manejo e conservação do solo e da água (ODS6) e de conservação e proteção de biodiversidade (ODS15). Como consequência, o documento contribui para os esforços de mitigação e adaptação da agricultura às mudanças climáticas e de capacitação de pequenos agricultores para se adaptarem a essas mudanças (ODS13). O documento contribui também para os objetivos 8, 12 e 17, no que se refere ao crescimento econômico dos agricultores familiares pela produção de erva-mate num modelo sustentável (ODS8), à produção responsável, que assegura o consumo de produtos naturais saudáveis e de qualidade (ODS12) e às parcerias entre a pesquisa, extensão, agricultores e suas organizações por meio da circulação do conhecimento propiciado pela pesquisa participativa (ODS17).

Marcílio José Thomazini

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Florestas

Sumário

Introdução.....	9
Metodologia.....	10
Área de estudo.....	10
Distribuição das parcelas experimentais e amostragem de solos e serapilheira.....	14
Indicadores químicos, físicos e biológicos dos solos.....	15
Análises químicas e físicas.....	16
Estoques de carbono e de nitrogênio do solo e de nutrientes na serapilheira.....	16
Indicadores biológicos do solo.....	17
Comunidades de minhocas.....	17
Carbono da biomassa microbiana e respiração basal do solo.....	18
Atividade enzimática do solo.....	18
Avaliação da qualidade do solo.....	18
Análises estatísticas.....	19
Resultados e Discussão.....	19
Indicadores físicos, químicos e estoques de carbono e de nitrogênio dos solos.....	19
Atributos físicos e químicos dos solos.....	27
Teores e estoques de carbono e de nitrogênio totais do solo.....	27
Atributos biológicos dos solos.....	30
Densidade, biomassa e riqueza de minhocas.....	30
Carbono da biomassa microbiana, respiração e atividade enzimática.....	33
Produção e estoques de nutrientes da serapilheira.....	36
Avaliação da qualidade do solo e provimento de serviços ecossistêmicos.....	41
Resumo dos Resultados.....	45
Conclusões.....	46
Agradecimentos.....	47
Referências.....	47

Introdução

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) é uma espécie florestal não madeireira, muito apreciada no Centro-Sul do Brasil e utilizada para a produção de bebidas como o chimarrão, o tererê e o chá-mate, rica em antioxidantes e energizantes (Borges et al., 2019; Samoggia et al., 2021; Ramirez et al., 2022). A sua produção constitui em importante fonte de renda para agricultores, principalmente familiares no centro-sul e sul do Paraná e norte de Santa Catarina (Chaimsohn; Radomski, 2016), e dá suporte a um mercado com potencial de expansão nacional e internacional.

Dentre os diferentes sistemas de manejos que podem ser empregados, dois se destacam para o cultivo e colheita de erva-mate, tendo variações conforme a necessidade de produção e região de cultivo (Marques et al., 2019; Lacerda et al., 2020).

O primeiro é a utilização de sistemas agroflorestais (SAF), os quais integram fragmentos nativos da Floresta Ombrófila Mista Montana (FOMM) ou Floresta com Araucária com o cultivo de erva-mate (Heck; Mejia, 2007; Montagnini, 2020), onde o plantio das mudas e o cultivo da erva-mate ocorre com o sombreamento promovido pela floresta nativa, e tradicionalmente sem a aplicação de fertilizantes e calagem (Montagnini et al., 2011; Motta et al., 2020).

Neste caso, leva-se em consideração que a erva-mate é uma planta que evoluiu em associações com *Araucaria angustifolia* e de forma integrada com outras espécies florestais da região subtropical do Sul do Brasil, tolerante às baixas temperaturas e ao sombreamento, de intensidade média em qualquer idade, e suportando mais luz na fase adulta. A erva-mate ocorre naturalmente em solos de baixa fertilidade, com altos teores de alumínio e baixo valor de pH, com baixos teores de cátions trocáveis, apresentando nas raízes associação simbiótica com fungos micorrizas arbusculares (Carvalho, 1994, 2003).

O segundo utiliza o sistema silvipastoril com a criação de gado em pastagem naturalizada, sendo conhecido como caíva ou potreiro dependendo da região (Hanisch et al., 2016, 2019, 2022).

Estes tipos de sistemas de produção foram primariamente implantados no Brasil e realizados principalmente por agricultores familiares que, com base no conhecimento coletivo acumulado culturalmente ao longo do tempo, desenvolveram práticas de manejo e interação com os recursos florestais, de base ecológica, obtendo diversos produtos, entre os quais a erva-mate (Lacerda, 2019a, 2019b).

Os sistemas de produção de erva-mate baseado no manejo tradicional em ambiente da Floresta com Araucária praticado na região de Bituruna, PR, têm entre as principais vantagens, a contribuição para a conservação de remanescentes florestais, principalmente em sistemas de produção de agricultura familiar (Marques, 2014); e o potencial aumento na fertilidade do solo sem o uso de fertilizantes (Day et al., 2011; Eibl et al., 2017; Machado et al., 2021). Já o sistema de cultivo da erva-mate por monocultura sob pleno sol (Motta et al., 2020) visa o aumento da eficiência de produção, por permitir uma maior quantidade de mudas por área de cultivo e facilitar a mecanização da colheita (Heck; Mejia, 2007). Segundo Marques (2014), os sistemas de cultivo da erva-mate se diferenciam quanto às características finais do produto, o qual, de maneira geral, apresenta propriedades organolépticas superiores em sistemas agroflorestais.

Sistemas agroflorestais (SAF) bem manejados são reconhecidos no uso sustentável da terra e na produção de alimentos, manutenção de biodiversidade, mitigação de gases de efeito estufa (GEE), melhorando a qualidade e disponibilidade da água, armazenamento de carbono, entre outros serviços

ecossistêmicos ou serviços ambientais (Verchot et al., 2007; Nair et al., 2011; Pinho et al., 2012; Santos et al., 2020a). No Sul do Brasil os sistemas agroflorestais mais adotados são os do tipo sucessionais ou dinâmicos, que se caracterizam pela composição do sistema em multiestratos. São sistemas complexos quanto à composição e ao manejo, visam à segurança alimentar e à geração de renda familiar, pois incluem o cultivo de espécies econômicas dentro da floresta (Radomski et al., 2014).

A qualidade do solo é um dos principais pilares da sustentabilidade agrícola e florestal, entendendo-se aqui, como qualidade do solo, a sua capacidade de produzir bens e serviços econômicos e de regular o ambiente (Lal, 2005). Nesse contexto, a matéria orgânica do solo (MOS) é um determinante da fertilidade dos solos tropicais, exercendo funções que provêm serviços ecossistêmicos do solo (Tiessen et al., 1994, Feller et al., 2006, 2012; Xavier; Mendonça, 2011; Gerasimova et al., 2015; FAO, 2017) e o principal compartimento de carbono nos ecossistemas terrestres (Scharlemann et al., 2014). O crescente interesse em conservar funções do solo para aumentar a prestação de serviços ecossistêmicos resulta no interesse em avaliar os efeitos de diferentes práticas de manejo e uso da terra na qualidade do solo (Rodriguez et al., 2021).

Nesse contexto, no qual se busca por sistemas de cultivo que incrementem a qualidade do solo, mantendo o estoque de carbono e favorecendo a atividade biológica e conseqüentemente, melhorando a ciclagem de nutrientes, é de interesse avaliar os sistemas de cultivos tradicionais de erva-mate. Para contribuir com o avanço do conhecimento sobre a qualidade do solo desses sistemas, foi realizado um estudo de caso em propriedades de agricultores familiares, com os objetivos de caracterizar os atributos dos solos, selecionar indicadores eficientes e avaliar a qualidade do solo, em quatro sistemas de produção. Foram avaliados atributos químicos (fertilidade, carbono e nitrogênio totais), físicos (densidade do solo e granulometria), microbiológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo, atividade das enzimas Beta-glucosidase e urease, e atividade microbiana - FDA), e biológicos (densidade, biomassa, riqueza total, biomassa relativa, e densidade ou abundância relativa de minhocas) do solo, além da produção e estoque de nutrientes da serapilheira. Os sistemas de produção compreenderam duas propriedades em sistemas agroflorestais de erva-mate sombreada (SAF-A e SAF-B), uma em sistema agroflorestal integrado com uso de gado (Caíva) e uma em sistema de monocultivo (Pleno Sol) no Município de Bituruna, PR.

Metodologia

Área de estudo

As áreas de estudo estão localizadas em propriedades rurais de produção de erva-mate em Bituruna, PR, região de ocorrência de Floresta Ombrófila Mista Montana (FOMM) do bioma Mata Atlântica. O clima da região é Cfb (subtropical), sem estação seca, com precipitação pluviométrica média anual entre 1.600 mm e 1.700 mm, mesotérmico ameno com temperaturas médias anuais entre 15 °C e 18 °C, com verões amenos e ocorrência severa e frequente de geadas no inverno (Nitsche et al., 2019).

As áreas estão localizadas próximas entre si (menos de 2 km) e apresentam condições edáficas semelhantes, com relevo ondulado tendo declives moderados de 8% a 20%, diferindo apenas nos usos da terra, sendo: sistemas agroflorestais tradicionais agroecológicos (SAF-A e SAF-B), sistema silvipastoril com uso de gado de leite (Caíva) e monocultivo (Pleno Sol), cujas informações resumidas são apresentadas na Tabela 1.

Os solos são originários de rocha basáltica, variam de rasos a pouco profundos e geralmente classificados como Cambissolos de textura argilosa a muito argilosa. O solo do SAF-A é um Cambissolo

Háplico Tb aluminico petroplíntico e o do SAF-B é um Cambissolo Húmico aluminico léptico. Embora sejam muito argilosos, apresentam boa estrutura, o que favorece a infiltração e drenagem de água, importante para o desenvolvimento da erva-mate, que não tolera solos mal drenados. O horizonte A desses solos tem baixa fertilidade natural (distróficos), baixo pH, alta saturação de alumínio, baixa saturação de bases, valores baixos a médios de fósforo e média concentração de matéria orgânica (Chaimsohn; Souza, 2012; Santos et al., 2018).

Tabela 1. Localização das áreas de plantio pertencentes às empresas do setor florestal estudadas (coordenadas, altitude, município, nome da área de plantio, empresa e grupo a que pertence).

Sistema de Produção	Sigla	Altitude (m)	Coordenada Geográfica (GMS)	Densidade de Árvores * (árvores ha ⁻¹)	Observação **
Sistema tradicional agroecológico em Floresta com Araucária (Figura 1)	SAF-A (Santos, 2009)	1.030	S 26° 12' 6.442" O 51° 26' 32.288"	388±78	Área com adensamento de erva-mate plantada há cerca de 18 anos, entre erva-mate nativas e floresta secundária em estágio médio de sucessão ecológica dominada por espécies florestais pioneiras e secundárias iniciais. Não é feita calagem nem adubação nesse sistema.
Sistema tradicional agroecológico em Floresta com Araucária (Figura 2)	SAF-B	930	S 26° 10' 8.249" O 51° 21' 55.547"	940±174	Área com adensamento de erva-mate plantada há cerca de 15 anos, entre erva-mate nativas com idades de 50 a 100 anos, sob vegetação florestal mais antiga e mais densa do que em SAF-A, em estágio secundário médio com dominância de araucária, junto com pioneiras e espécies secundárias. Não é feita calagem nem adubação nesse sistema.
Sistema Silvopastoril tradicional em Floresta com Araucária (Figura 3)	Caíva - CAI (Hanisch et al., 2019)	807	S 26° 10' 8.249" O 51° 21' 55.547"	236±72	Área com 20 a 50 anos de manejo integrado da erva-mate nativa em fragmento florestal com araucária menos denso, e gado de leite em pastagem.
Sistema de erva-mate em monocultivo sob pleno sol (Figura 4)	Pleno Sol - SOL	938	S 26° 11' 1.197" O 51° 22' 13.483"	200±103	Área com erva-mate plantada adensada há cerca de 20 anos, com manejo e aplicação de insumos.

* Considerando árvores com circunferência à altura do peito – CAP igual ou maior que 15 cm, entretanto, a erva-mate não foi inventariada uma vez que tinha CAP menor que 15 cm, conforme informado por Denise Jeton Cardoso (comunicação pessoal)¹.

** Informações fornecidas pelos agricultores.

¹ E-mail recebido pelo eng. agrônomo Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto, pesquisador da Embrapa Solos, da engenharia florestal. Denise Jeton Cardoso, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR, em 18 de abril de 2022.



Figura 1. Vista geral da área (A e B) em sistema tradicional de produção de erva-mate em Floresta com Araucária, com adensamento de erva-mate com cerca de 18 anos de cultivo (SAF-A).



Figura 2. Vista geral da área (A e B), detalhes da serapilheira (C), da interface entre a serapilheira e a superfície do solo (D), e do perfil superficial do solo na minitrincheira (E), em sistema tradicional de produção de erva-mate em Floresta com Araucária, com adensamento de erva-mate e indivíduos nativos com idade avançada (SAF-B).



Figura 3. Vista geral da área (A, B e C) e perfil do solo (D) em sistema Caíva - manejo integrado da erva-mate e pastagem em fragmento florestal com araucária.



Figura 4. Vista geral da área (A), da vegetação herbácea e serapilheira (B), e detalhes da serapilheira com gabarito quadrado após a coleta da serapilheira (C), e do perfil superficial do solo na minitrincheira (D), em sistema de cultivo de erva-mate em monocultivo (Pleno Sol).

Distribuição das parcelas experimentais e amostragem de solos e serapilheira

Em cada um dos quatro sistemas de produção de erva-mate foi delimitada uma parcela experimental com objetivo de desenvolver os estudos interdisciplinares relacionados com a qualidade de solos.

As parcelas foram delimitadas com piquetes na dimensão de 50 m x 50 m (2.500 m² ou 1/4 de ha), a qual foi subdividida em 25 subparcelas de 10 m x 10 m (100 m² ou 1/10 de ha, Figura 5).

As amostragens de solos e de serapilheira foram realizadas em dez subparcelas, destacadas em cor cinza (Figura 5), sendo que o mesmo esquema de amostragem foi utilizado nos quatro sistemas de produção estudados.

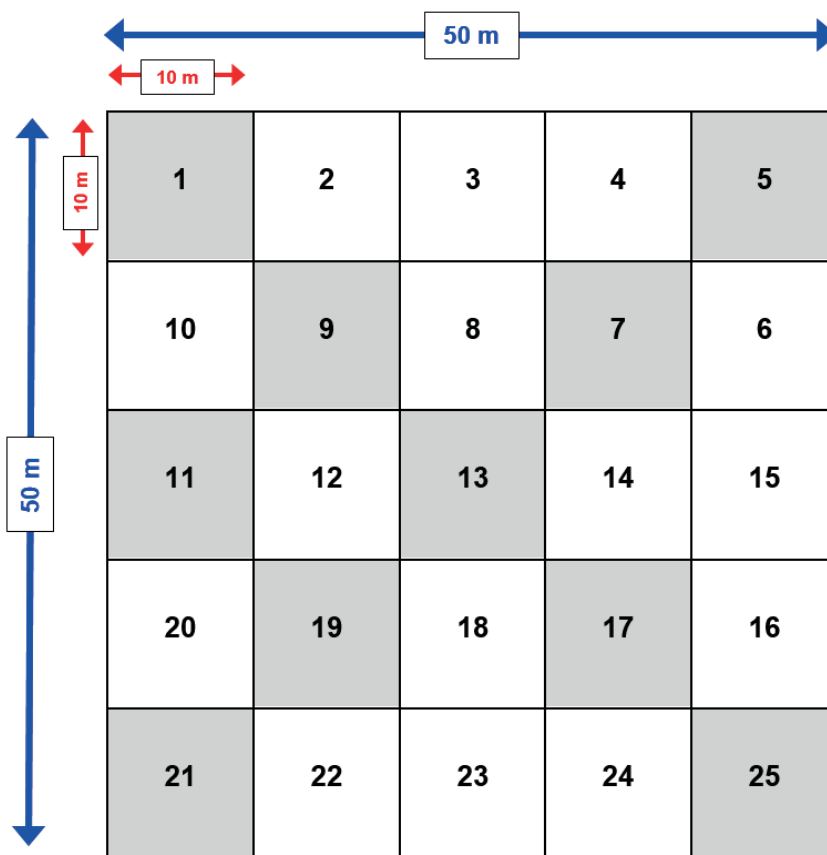


Figura 5. Croqui da parcela experimental delimitada (0,25 ha) em cada sistema de produção de erva-mate na região de Bituruna, PR. As amostragens de solos e de serapilheira foram realizadas nas áreas correspondentes às células de cor cinza.

Os solos e a serapilheira foram amostrados em novembro de 2018 e de 2019. Nas dez subparcelas distribuídas em cada sistema (Figura 5) foram coletadas amostras simples de solo com auxílio de uma pá reta, nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm de profundidade (Figura 6A), o que corresponde à coleta de dez amostras em cada camada, em cada sistema de produção. Para determinação da densidade do solo foram coletadas amostras simples indeformadas em cilindros metálicos de 100 cm³, no meio de cada camada correspondente. As coletas de amostras simples para análises microbiológicas e de minhocas foram realizadas em 2018 nos mesmos locais das amostras de solos, mas restritas às camadas de 0-10 cm, e de 0-20 cm de profundidade, respectivamente. A serapilheira foi amostrada nas mesmas subparcelas utilizando gabarito quadrado de 50 cm x 50 cm, de acordo com metodologia descrita por UNFCCC (2015) (Figura 6B).



Figura 6. Trincheira para amostragem de solo (A) nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm de profundidade, e amostragem de serapilheira (B).

Indicadores químicos, físicos e biológicos dos solos

Os indicadores químicos, físicos e biológicos dos solos, avaliados nas áreas de estudo, estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2. Indicadores químicos, físicos e biológicos avaliados nos solos das áreas de estudo.

Sigla	Indicadores do Solo
C total	Carbono Total (g kg ⁻¹)
N total	Nitrogênio Total (g kg ⁻¹)
pH CaCl ₂	pH em solução CaCl ₂
Al	Alumínio trocável – Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)
H+Al	Acidez Potencial do Solo - H ⁺ Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)
Ca	Cálcio trocável – Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)
Mg	Magnésio trocável – Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)
K	Potássio trocável – K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)
Valor S	Soma de Bases Trocáveis (cmol _c dm ⁻³)
Valor T ou CTC Total	Capacidade de Troca de Cátions Total (cmol _c dm ⁻³)
P	Fósforo disponível (mg dm ⁻³)
Valor V ou V%	Percentagem de Saturação por Bases (%)
m	Percentagem de Saturação por Alumínio (%)
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio, da serapilheira
Est-C	Estoque de Carbono (Mg ha ⁻¹), do solo ou serapilheira

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Sigla	Indicadores do Solo
Est-N	Estoque de Nitrogênio (Mg ha^{-1}), do solo ou serapilheira
CGA	Umidade Atual do Solo em base Gravimétrica (kg kg^{-1})
CVA	Umidade Atual do Solo em base Volumétrica (kg dm^{-3})
DS	Densidade do Solo (g cm^{-3} ; equivalente a kg dm^{-3})
Argila	Teor de Argila no Solo (g kg^{-1})
Silte	Teor de Silte no Solo (g kg^{-1})
Areia	Teor de Areia no Solo (g kg^{-1})
Produção de serapilheira	Quantidade de serapilheira acumulada por hectare (Mg ha^{-1})
Est-Nutr-Ser	Quantidade total de nutrientes estocados na serapilheira por hectare (= $\text{N}+\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{P}+\text{S}$, em kg ha^{-1})
C-BMS	Carbono da Biomassa Microbiana (mg C kg^{-1} de solo)
RBS	Respiração Basal do Solo ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
qCO ₂	Quociente Metabólico ($\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-BMC h}^{-1}$)
qMIC	Quociente Microbiano (%)
Beta-GI	Atividade da Enzima Beta-glucosidase ($\text{mg p-nitrofenol kg}^{-1}$ de solo h^{-1})
Ure	Atividade da Enzima Urease ($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1}$ de solo 2 h^{-1})
FDA	Atividade da Hidrólise do FDA (diacetato de fluoresceína) ($\mu\text{g de FDA g}^{-1}$ de solo h^{-1})
Biomassa	Biomassa média de minhocas coletadas ($\text{g peso fresco m}^{-2}$)
Densidade	Número médio de minhocas coletadas ($\text{No indivíduos m}^{-2}$)
Riqueza	Número de espécies de minhocas coletadas
Abundância relativa	Abundância relativa das diferentes espécies de minhocas coletadas (%)
Biomassa relativa	Biomassa relativa das diferentes espécies de minhocas coletadas (%)

Análises químicas e físicas

O preparo e as análises físicas e químicas das amostras de solos para obter os respectivos indicadores do solo (Tabela 2) seguiram os procedimentos descritos por Teixeira et al. (2017), sendo que a análise granulométrica foi realizada após 16 horas de agitação mecânica e dispersão química com solução $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$, e o teor de argila foi determinado usando o método da pipeta. A Acidez Potencial do Solo ($\text{H}^++\text{Al}^{3+}$) foi determinada por potenciometria em solução-tampão SMP (Nogueira; Souza, 2005). A Umidade Atual do Solo é a massa de água presente na amostra de solo nas condições da coleta, sendo determinada em base gravimétrica ($\text{CGA (kg kg}^{-1}) = [\text{massa da amostra úmida} - \text{massa da amostra seca}] / \text{massa da amostra seca}$), e a umidade em base volumétrica ($\text{CVA (kg dm}^{-3}) = [\text{massa da amostra úmida} - \text{massa da amostra seca}] / \text{volume da amostra}$). Carbono, nitrogênio e enxofre totais foram determinados por combustão seca, de acordo com Nelson e Sommers (1982) em um analisador elementar CHNS. A estimativa do teor de matéria orgânica do solo (MOS) foi feita multiplicando o valor de C Total pelo fator 1,724, que considera ter 58% de carbono orgânico na composição da matéria orgânica (Machado et al., 2003). As análises químicas dos nutrientes (N, Ca, Mg, K, P e S) na serapilheira foram realizadas segundo relato de Silva (2009).

Estoques de carbono e de nitrogênio do solo e de nutrientes na serapilheira

Os estoques de carbono e de nitrogênio totais no solo indica o tamanho da reserva desses elementos acumulados em uma camada do solo, por hectare (Mg ha^{-1}). O cálculo dos estoques de carbono total (Est-C camada) e de nitrogênio total (Est-N camada) do solo foi feito em cada camada amostrada

(0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm), utilizando a equação (FAO, 2020): estoques (Mg ha^{-1}) = concentração (g kg^{-1}) x densidade aparente da camada (g cm^{-3}) x espessura da camada (cm). Em seguida foram calculados os valores totais dos estoques para o perfil do solo (Mg ha^{-1}), referente à camada de 00-40 cm de profundidade, de carbono total (Est-C perfil) e de nitrogênio total (Est-N perfil) do solo, somando os valores dos respectivos estoques das três camadas amostradas. Os estoques de carbono, nitrogênio e de nutrientes da serapilheira acumulada foram obtidos a partir da concentração de nutrientes e do material orgânico seco, estimados pela equação: estoques (Mg ha^{-1}) = concentração de nutrientes da serapilheira (g kg^{-1}) x massa de serapilheira seca (Mg ha^{-1}) (Caldeira et al., 2019).

Indicadores biológicos do solo

Comunidades de minhocas

As coletas de campo foram realizadas em novembro de 2018, utilizando o método modificado Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) descrito por Anderson e Ingram (1993). Em cada sistema, realizou-se a amostragem de dez monólitos de solo com dimensão de 25 cm x 25 cm de largura e 20 cm de profundidade (Figura 7A). Os monólitos foram distribuídos aleatoriamente dentro das dez sub-parcelas de cada área (Figura 5). As minhocas foram coletadas no campo, por seleção manual dos monólitos de solo (Figura 7B), e foram imediatamente fixadas em etanol 92%, para posterior identificação em laboratório, em nível de espécie. Os resultados foram expressos em: (1) densidade de minhocas por metro quadrado (número de indivíduos m^{-2}); (2) biomassa de peso fresco por metro quadrado (g m^{-2}); (3) riqueza total de espécies (número total de espécies diferentes encontradas em cada sistema de produção de erva-mate), a biomassa relativa (%); e (4) a densidade ou abundância relativa (% , sendo o nº de indivíduos de uma espécie em relação ao nº total de indivíduos da comunidade) das espécies em cada sistema. A riqueza total de espécies foi obtida mediante observações morfológicas dos organismos, com auxílio de microscópio estereoscópio (lupa) e a utilização de microscópio óptico comum. A identificação das espécies foi realizada usando chaves para a classificação da família, gênero e espécie de minhocas, de acordo com a bibliografia taxonômica (Righi, 1984; 1990; Ishizuka, 1999; Blakemore, 2002; Lima; Rodriguez, 2007). A biomassa das minhocas foi obtida por meio de pesagem dos organismos em laboratório, com auxílio de uma balança analítica (0,01 g), e os valores extrapolados para metro quadrado.



Figura 7. Trincheira para amostragem de solo (A) nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm de profundidade, e amostragem de serapilheira (B).

Carbono da biomassa microbiana e respiração basal do solo

Para a determinação do carbono da biomassa microbiana (C-BMS, em mg kg⁻¹), foi utilizada a metodologia de fumigação-extração (Vance et al., 1987). Após a correção da umidade, o C microbiano foi obtido das amostras fumigadas e não fumigadas, utilizando-se um fator de conversão de fluxo (Kc) de 0,33 (Sparling; West, 1988). A respiração basal do solo (RBS em µg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) foi estimada por meio da quantidade de CO₂ liberado do solo durante o período de sete dias de incubação, como descrito por Jenkinson e Powlson (1976).

Atividade enzimática do solo

A atividade da enzima Beta-glucosidase (Beta-Gl, em mg p-nitrofenol kg⁻¹ de solo h⁻¹; E.C. 3.2.1.21), que é ligada ao ciclo do carbono, foi determinada por meio da metodologia descrita por Tabatabai (1994). Para análise da atividade da enzima urease (Ure, em µg NH₄-N g⁻¹ de solo 2h⁻¹; E.C. 3.5.1.5), ligada ao ciclo do nitrogênio, foi utilizado o método descrito por Kandeler e Gerber (1988). Para a atividade da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA, em µg de FDA g⁻¹ de solo h⁻¹), foi utilizada a metodologia descrita por Schnürer e Rosswall (1982), modificada por Adam e Duncan (2001).

Avaliação da qualidade do solo

A abordagem utilizada por Schipanski et al. (2014), para a avaliação de serviços ecossistêmicos, foi utilizada para a normalização dos dados dos indicadores de qualidade do solo dos sistemas de produção. Os dados foram transformados para uma escala uniforme (de 0 a 1), de forma a converter valores absolutos dos indicadores medidos para valores em uma escala relativa (denominadas funções de pontuação).

Cada sistema produtivo foi representado por um diagrama de radar mostrando, em cada eixo, os indicadores de qualidade de solo. O valor para cada eixo de um determinado sistema é relativo ao valor máximo obtido, de cada indicador, entre os quatro sistemas. Desta forma, o comprimento relativo de cada eixo no diagrama radar denota a magnitude relativa de cada indicador em um determinado sistema. Um eixo completo representa o valor máximo (valor 1), portanto, quanto maior a área do gráfico gerado, maior o desempenho relativo dos indicadores de qualidade do solo e maior a provisão de serviços ecossistêmicos naquele sistema produtivo.

A escolha do diagrama de radar como instrumento de avaliação da qualidade do solo se deve à praticidade da sua aplicação para subsidiar a tomada de decisão sobre melhorias de manejo a serem feitas e monitoramento de mudanças com o tempo (Gareau et al., 2010; Smith et al., 2011; Nicholls et al., 2004, 2020).

Entre os indicadores avaliados nesse estudo, até dez indicadores foram selecionados considerando os que foram mais eficientes em mostrar diferenças entre os sistemas de produção, e que integrem dois ou mais atributos do solo, bem como que representam processos-chaves ecológicos do solo relacionados com a expressão de funções e funcionamento do sistema solo (Vezzani; Mielniczuk, 2009; Simon et al., 2022).

Como a amostragem microbiológica foi feita somente na camada superficial do solo, para os demais indicadores foram utilizados somente os dados coletados na camada 0-10 cm.

Neste caso, os diagramas de radar permitem avaliar qualitativamente (visualmente a área do diagrama) a qualidade do solo em cada sistema de produção, bem como quantitativamente o valor relativo individual de cada indicador de qualidade, em cada sistema de produção.

Para fazer uma avaliação quantitativa do diagrama radar de cada sistema, foi feita a transformação dos valores relativos (de 0 a 1) dos indicadores de qualidade do solo, para centímetros (cm), visando calcular

a área do gráfico de radar em quantidade relativa (área radar em cm^2). A soma das áreas de todos os indicadores corresponde ao valor da área total do diagrama de radar, portanto, representando o efeito do conjunto de indicadores que contribuem para expressar a qualidade do solo em cada sistema de produção.

Análises estatísticas

A análise estatística descritiva dos atributos físico-químicos do solo considerou um desenho aleatório completo com dez repetições (para os indicadores determinados em 2018, conforme item 2.2) e com vinte repetições (para os indicadores determinados em 2018 e 2019, conforme item 2.2), em cada área avaliada. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, usando o software R versão 1.4.1717. Foi calculada a média e desvio padrão para cada variável avaliada. A comparação entre as médias dos indicadores físicos, químicos e microbiológicos dos solos dos sistemas de produção de erva-mate, por camada de solo, foi feita utilizando o intervalo de confiança calculado com base no Teste t de Student (5%). Para os resultados de minhocas (item 2.4.1), foi aplicado o teste Tukey usando o software Statistica 7.0 da Statsoft.

Resultados e Discussão

Indicadores físicos, químicos e estoques de carbono e de nitrogênio dos solos

Atributos físicos e químicos dos solos

A Figura 8 mostra que os solos das áreas do SAF-A e Caíva tem textura muito argilosa nas três camadas, que não diferem entre si, e cujos teores de argila aumentaram com a profundidade, respectivamente, de 630 g kg^{-1} a 670 g kg^{-1} , e de 666 g kg^{-1} a 718 g kg^{-1} . SAF-B e Pleno Sol tem textura argilosa nas três camadas, que não diferem entre si, exceto em 20-40 cm onde Pleno Sol tem maior quantidade; sendo que os teores não variaram no perfil do solo estudado (0-40 cm) em SAF-B com valor médio de 498 g kg^{-1} , entretanto em Pleno Sol aumentaram com a profundidade de 578 g kg^{-1} a 629 g kg^{-1} . Apesar das quatro áreas terem uma quantidade elevada de argila, nota-se que, em relação à Caíva que tem a maior quantidade média no perfil do solo (690 g kg^{-1}), o SAF-B tem 28% e o Pleno Sol 13% menos argila. A quantidade de areia é pequena e homogênea nos perfis do solo (0-40 cm) das quatro áreas. Entretanto, o SAF-B tem a maior quantidade com valor médio de 152 g kg^{-1} , seguido pelo Pleno Sol (77 g kg^{-1}) e o SAF-A (62 g kg^{-1}), e a área com Caíva tem a menor quantidade de areia (34 g kg^{-1}). A quantidade de silte tem um pequeno gradiente decrescente com o aumento da profundidade nas áreas de cada sistema de produção, exceto no SAF-B onde é homogêneo; sendo que SAF-B tem o maior valor médio do perfil do solo (350 g kg^{-1}), Pleno Sol com valor médio intermediário (323 g kg^{-1}), e SAF-A (290 g kg^{-1}) e Caíva (276 g kg^{-1}) a menor quantidade média de silte no perfil do solo.

Os valores da densidade do solo (DS) nos quatro sistemas estão entre $0,79 \text{ g cm}^{-3}$ (0-10 cm no SAF-A) e $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ (20-40 cm no Pleno Sol) que estão na faixa de valores encontrados em solos argilosos (de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,7 \text{ g cm}^{-3}$), e abaixo de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ que, em geral, está relacionado a solos argilosos compactados com riscos ao desenvolvimento radicular (Reichert et al., 2003; Reinert; Reichert, 2006). O SAF-A e Pleno Sol apresentaram, no perfil do solo (0-40 cm), um gradiente de aumento da DS com a profundidade, respectivamente de $0,79 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,98 \text{ g cm}^{-3}$ (diferença de 19,4%) e de $0,89 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ (diferença de 21,3%). A DS se apresentou homogênea no perfil do solo tanto em SAF-B (média de $0,97 \text{ g cm}^{-3}$) como em Caíva (média de $1,07 \text{ g cm}^{-3}$). Na camada do solo de 0-10 cm as diferenças significativas ($p < 0,05$) dos valores da DS tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-A ($0,79 \text{ g cm}^{-3}$) \leq Pleno Sol ($0,89 \text{ g cm}^{-3}$) \approx SAF-B ($0,92 \text{ g cm}^{-3}$) $<$ Caíva ($1,10 \text{ g cm}^{-3}$) (Figura 9).

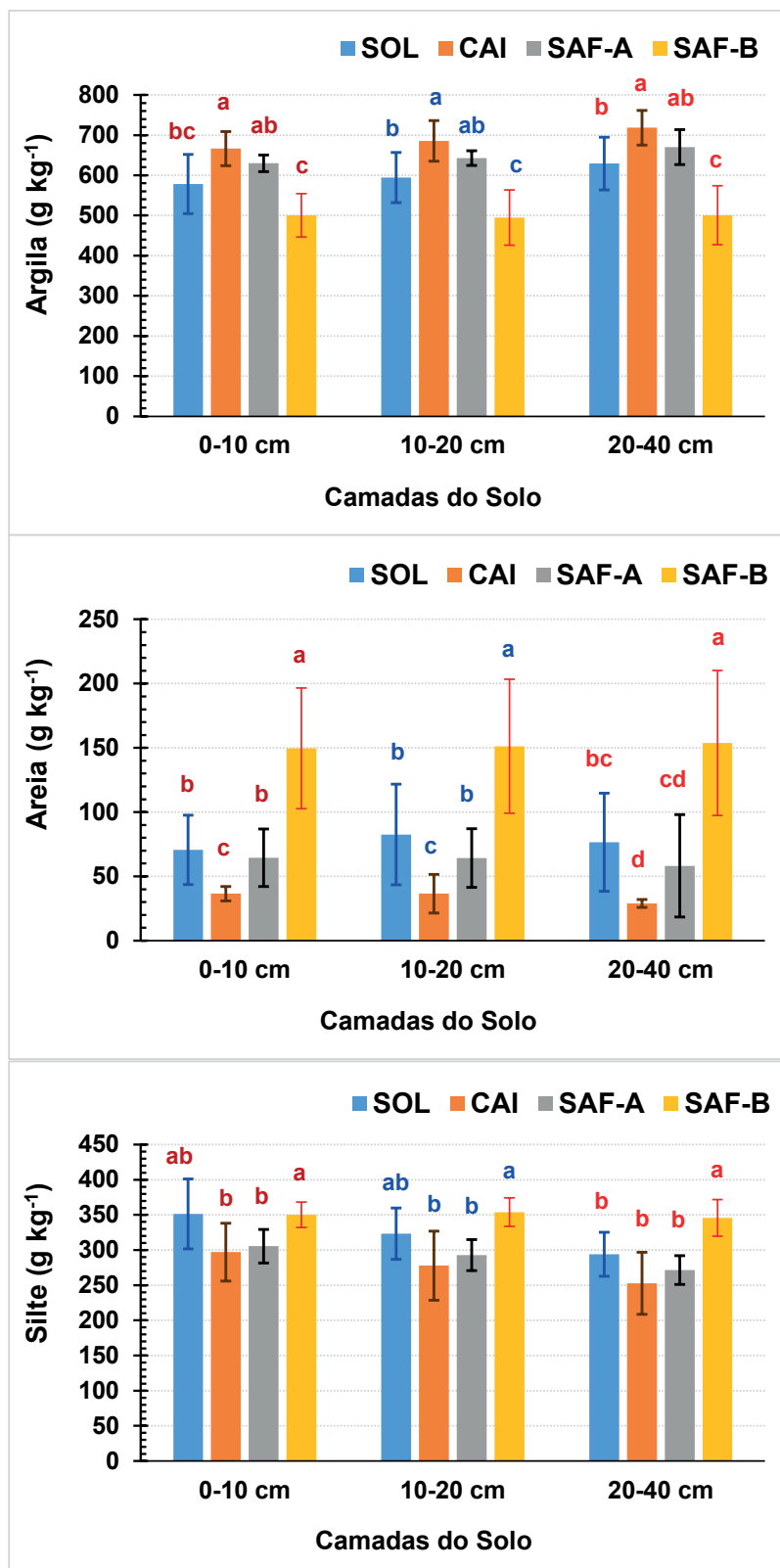


Figura 8. Teores de argila, areia e silte (g kg⁻¹) nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

A Umidade Atual do Solo, em base gravimétrica (CGA) e volumétrica (CVA), em geral, não apresentou diferenças entre os sistemas de produção, exceto CGA em 20-40 cm onde SAF-A apresentou maior valor em relação a Pleno Sol e Caíva, e SAF-B sendo intermediário. (Figura 9). Os valores

médios nos perfis de solos (0-40 cm) para SAF-A, SAF-B, Caíva e Pleno Sol foram respectivamente para CGA de 0,47 kg kg⁻¹, 0,38 kg kg⁻¹, 0,36 kg kg⁻¹ e 0,37 kg kg⁻¹; e para CVA de 0,41 kg dm⁻³, 0,36 kg dm⁻³, 0,39 kg dm⁻³ e 0,37 kg dm⁻³.

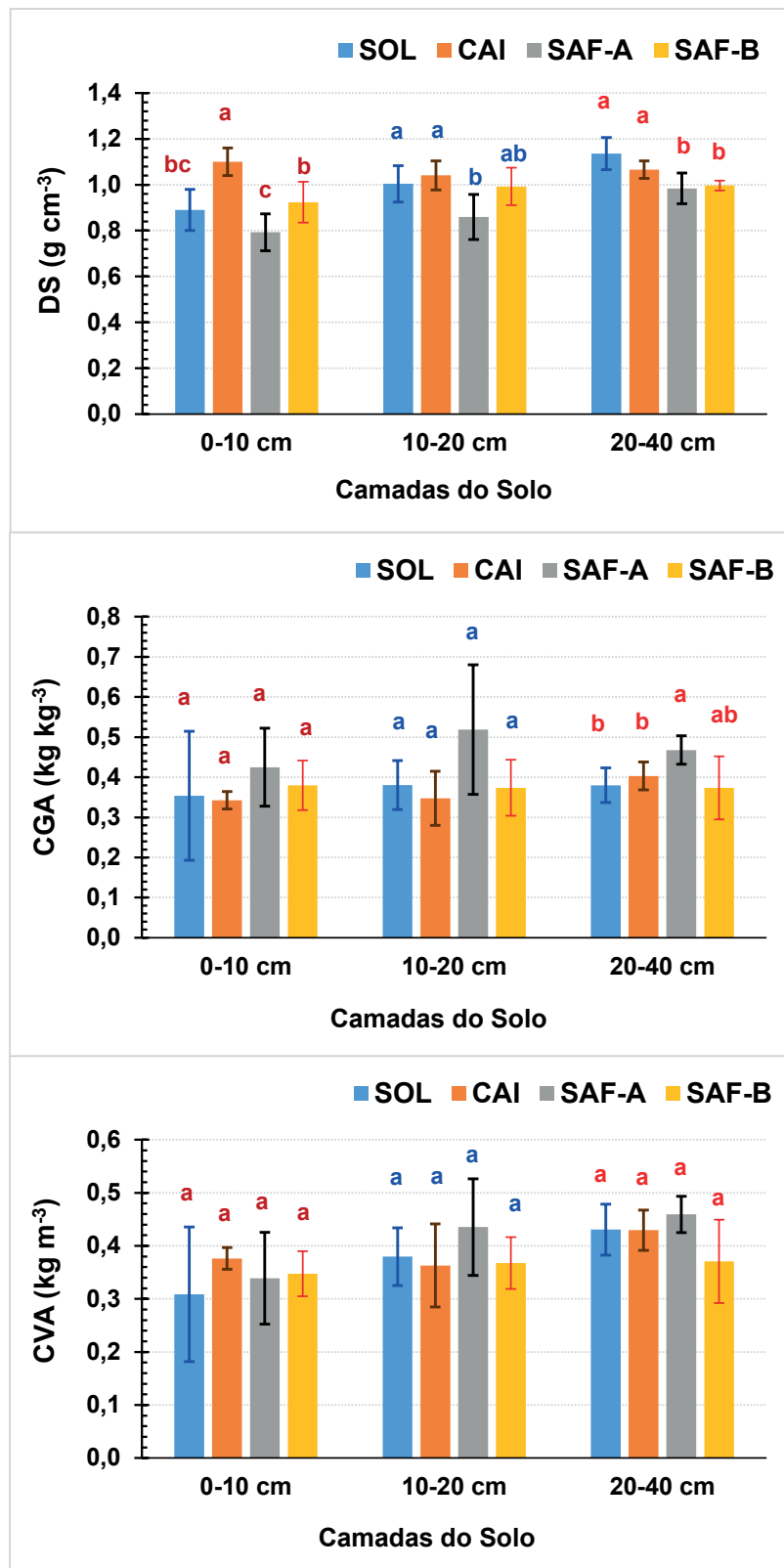


Figura 9. Densidade do Solo (DS, g cm⁻³), Umidade Atual do Solo em base Gravimétrica (CGA, kg kg⁻¹) e Umidade Atual do Solo em base Volumétrica (CGV, kg dm⁻³), nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

Em geral, os valores de pH foram iguais ou menores que 4,0 nas três camadas dos solos de SAF-A, SAF-B e Caíva, exceto na camada 0-10 cm em Caíva que apresentou pH 4,25; sendo que Pleno Sol apresentou valores maiores que pH 4,0 nas três camadas de solo (Figura 10). Na camada de 0-10 cm as diferenças significativas ($p < 0,05$) dos valores de pH tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-A (pH 3,71) \approx SAF-B (pH 3,80) $<$ Caíva (pH 4,25) $<$ Pleno Sol (pH 4,84), indicando efeito residual da aplicação de calcário no Pleno Sol, e do efeito da matéria orgânica decomposta proveniente do esterco de gado ao longo do tempo durante pastejo, no sistema Caíva.

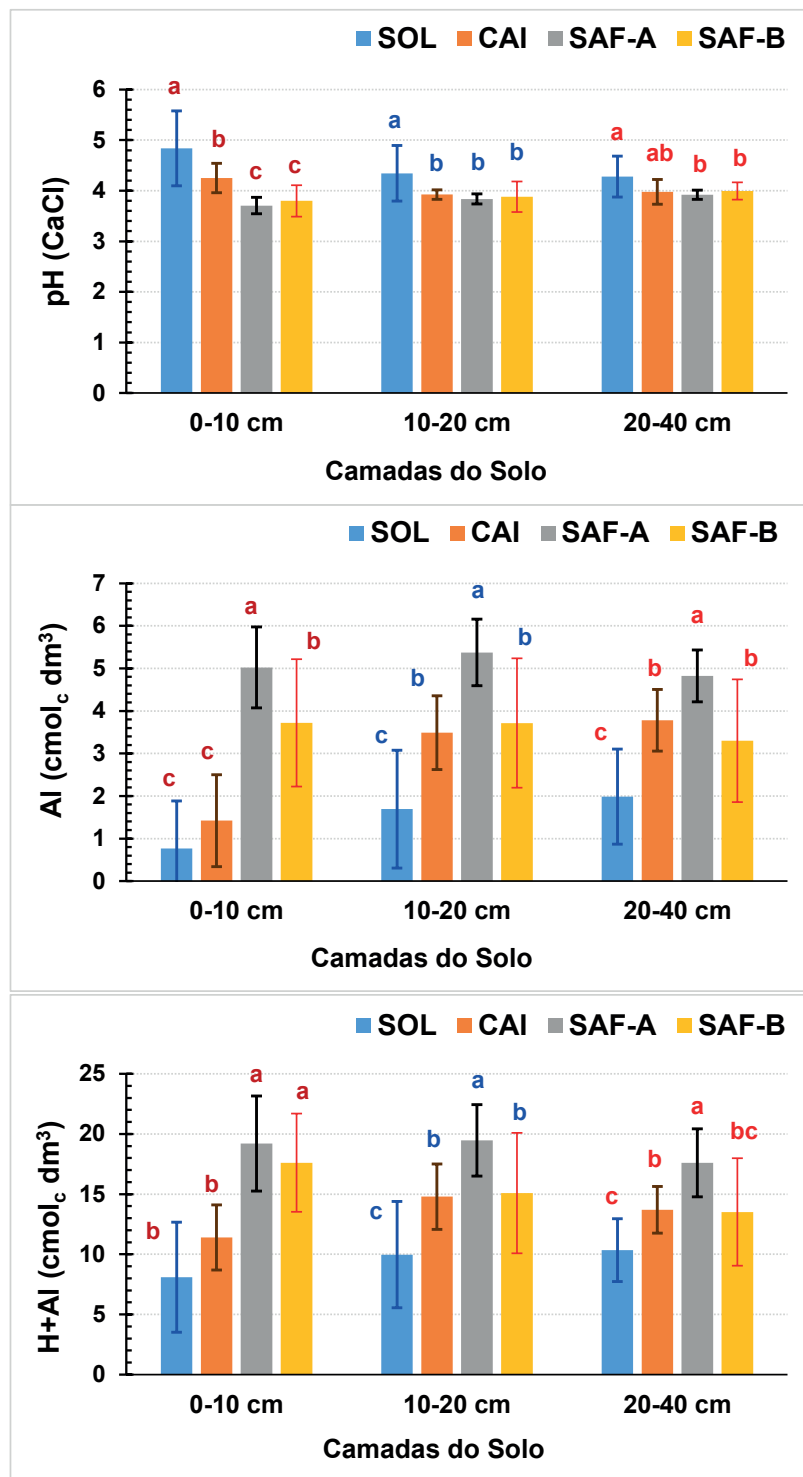


Figura 10. Valores de pH em CaCl₂, Al³⁺ trocável (cmol_c dm⁻³) e da Acidez Potencial do Solo (H+Al em cmol_c dm⁻³), nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

A erva-mate em seu processo de evolução natural integrada à Floresta com Araucárias, se adaptou às condições de solos com acidez elevada, tanto com valores baixos de pH como com teores altos de alumínio (Carvalho, 1994, 2003); sendo considerada como espécie tolerante ao alumínio, e que apresenta caráter calcífuga (Reissmann; Prevedello, 1992; Reinssmann et al., 1999; Reinssmann; Carneiro, 2004; Santin et al., 2013; Benedetti et al., 2017).

Com a aplicação de calcário no solo, os teores de alumínio trocável (Al^{3+}) na solução do solo diminuem com o aumento do pH, transformando-o para uma forma insolúvel (neutralização do $\text{Al} = \text{Al}^{3+} + 3 \text{OH}^- \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow$), conforme pode ser observado no comportamento inverso do Al^{3+} em relação ao do pH, com a diminuição do Al^{3+} de $1,99 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $0,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no sistema Pleno Sol, respectivamente de 20-40 cm a 0-10 cm (Figura 10). Na camada de 0-10 cm as diferenças significativas ($p < 0,05$) do teor de Al^{3+} tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: Pleno Sol ($0,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx Caíva ($1,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ SAF-B ($3,72 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ SAF-A ($5,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Nas camadas de 10-20 cm e 20-40 cm apresentaram a seguinte ordem dos valores médios de Al^{3+} dessas camadas, entre os sistemas: Pleno Sol ($1,84 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ SAF-B ($3,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx Caíva ($3,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ SAF-A ($5,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 10). Bom lembrar que há uma relação direta entre a quantidade de Al disponível na solução do solo com a saturação da CTC efetiva por Al (Valor m), conforme pode ser observado na Figura 12, na semelhança do comportamento dos valores de m% nas camadas dos solos entre sistemas.

O SAF-A apresentou maior acidez potencial no perfil do solo (0-40 cm) que os demais sistemas, com um valor médio das camadas de solo de $18,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo que, na camada de 0-10 cm, as diferenças significativas ($p < 0,05$) da H+Al tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: Pleno Sol ($8,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx Caíva ($11,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ SAF-B ($17,61 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx SAF-A ($19,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Na camada de 10-20 cm, sendo a seguinte ordem: Pleno Sol ($9,97 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ Caíva ($14,79 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx SAF-B ($15,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ SAF-A ($19,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Já na camada de 20-40 cm, o SAF-B ($13,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) não se diferenciou de Caíva ($13,70 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) nem do Pleno Sol com o menor valor ($10,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), mas se diferenciou do SAF-A que teve o maior valor ($19,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 10).

O sistema Pleno Sol apresentou os maiores teores de cálcio (Ca) disponível no perfil do solo em relação aos outros sistemas de produção, sendo de $5,45 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-10 cm, de $3,39 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na de 10-20 cm, e de $2,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na de 20-40 cm de profundidade, em função do calcário aplicado nesta área (Figura 11). Esses valores são considerados como “altos” na camada 0-10 cm, e “médios” nas outras duas camadas, com base nas classes de disponibilidade de Ca para erva-mate na camada 0-20 cm em MANUAL ... (2016). No sistema Caíva o teor de Ca ($4,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) também foi “alto” na camada 0-10 cm, e sem diferença significativa com o valor do Pleno Sol, o que sugere um efeito residual de aplicação de calcário ou por adição de Ca presente no esterco do gado. Entretanto, foram observados valores “baixos” de Ca (MANUAL ..., 2016) em Caíva nas demais camadas de solo, como nas três camadas de solo em SAF-A e SAF-B. Na camada de 10-20 cm as diferenças significativas ($p < 0,05$) do teor de Ca tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-A ($0,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx SAF-B ($0,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ Caíva ($1,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ Pleno Sol ($3,39 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

O sistema Pleno Sol também apresentou maiores teores de magnésio (Mg) disponível no perfil do solo em relação aos outros sistemas de produção, sendo de $2,82 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-10 cm, de $1,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na de 10-20 cm, e de $0,56 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na de 20-40 cm de profundidade, em função do calcário (dolomítico) aplicado na área (Figura 11). Esses valores são considerados como “altos” nas duas primeiras camadas do solo, e “médios” na camada mais profunda do solo, com base

nas classes de disponibilidade de Mg para erva-mate na camada 0-20 cm em MANUAL ... (2016). Na camada de 0-10 cm, SAF-A ($0,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e SAF-B ($0,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) não apresentaram diferença significativa entre si ($p < 0,05$) e tiveram valores “médios” de Mg (MANUAL ..., 2016). No sistema Caíva ($1,24 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ - Mg “alto”) não foi verificada diferença com o Pleno Sol na camada de 0-10 cm. Entretanto, nas camadas de 10-20 cm e de 20-40 cm, Caíva, SAF-A e SAF-B apresentaram valores “baixos” de Mg disponível (MANUAL ..., 2016) e não foi verificada diferença significativa entre eles ($p < 0,05$).

Para o teor de potássio (K) disponível não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os quatro sistemas de produção, nas três camadas de solo (Figura 11). Na camada de 0-10 cm, em média os sistemas tiveram $0,19 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ que é considerado como “médio”, com base nas classes de disponibilidade de K em relação à CTC Total do solo para erva-mate na camada 0-20 cm em MANUAL ... (2016). Na camada de 10-20 cm, apenas Pleno Sol apresentou valor “médio” de K, sendo que Caíva, SAF-A e SAF-B apresentaram valores “baixos” (MANUAL ..., 2016). Na camada de 20-40 cm, Pleno Sol, Caíva e SAF-B apresentaram valores “baixos” de K, enquanto que SAF-A teve valor “muito baixo” de K disponível (MANUAL ..., 2016).

Uma situação oposta aos resultados de Ca, Mg e K foi verificada com os teores de fósforo (P) disponível no solo, tendo o sistema Pleno Sol ($1,44 \text{ mg dm}^{-3}$ em 0-10 cm; $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ em 10-20 cm; e $0,51 \text{ mg dm}^{-3}$ em 20-40 cm) teores menores do que os outros três sistemas de produção (Figura 11). Esses valores são considerados como “muito baixos” com base nas classes de disponibilidade de P, para o caso de solos com teores de argila maiores que 40%, para erva-mate na camada 0-20 cm em MANUAL ... (2016). Na camada de 0-10 cm, Pleno Sol apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) com os outros sistemas, os quais não apresentaram diferença entre si nesta camada (média entre Caíva, SAF-A e SAF-B de $2,23 \text{ mg dm}^{-3}$ – valor considerado “baixo” com base em MANUAL ..., 2016) nem na de 10-20 cm (média entre Caíva, SAF-A e SAF-B de $1,14 \text{ mg dm}^{-3}$ – valor considerado “muito baixo” com base em MANUAL ..., 2016). Sendo que não houve diferença entre os quatro sistemas na camada de 20-40 cm (média entre eles de $0,62 \text{ mg dm}^{-3}$ – valor considerado “muito baixo” com base em MANUAL ..., 2016). Essa disponibilidade muito baixa de P no Pleno Sol pode ser explicada pela falta de adubação e diminuição da reserva de P na forma orgânica no solo (relacionado à menor quantidade de matéria orgânica nesse solo, observada nas Figuras 13 e 14), bem como pela alta capacidade do solo argiloso e com presença de óxidos de Fe e de Al em fixar o P (que é comum aos quatro sistemas).

A soma de bases trocáveis (Valor S) reflete a quantidade de Ca, Mg e K disponíveis no solo, em especial ao comportamento do Ca nos sistemas de produção, como pode ser observado na Figura 11. O sistema Pleno Sol apresentou os maiores Valores S no perfil do solo em relação aos outros sistemas, em função do calcário aplicado nesta área (Figura 12). Entretanto, em geral, os solos estudados têm valores S muito baixos, conforme observado nas demais camadas de solos dos demais sistemas, que variaram de $0,38 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 20-40 cm no SAF-A até $1,82 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-10 cm no SAF-B. Na camada de 0-10 cm, as diferenças significativas ($p < 0,05$) do Valor S tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-A ($1,29 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx SAF-B ($1,82 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ Caíva ($6,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx Pleno Sol ($8,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Na camada de 10-20 cm, as diferenças do Valor S tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-B ($0,67 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) \approx SAF-A ($0,69 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ Caíva ($1,48 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) $<$ Pleno Sol ($4,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Na camada de 20-40 cm houve uma diferença significativa ($p < 0,05$) entre Pleno Sol ($2,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e os outros sistemas que não tiveram diferenças entre eles (valor médio entre eles de $0,53 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

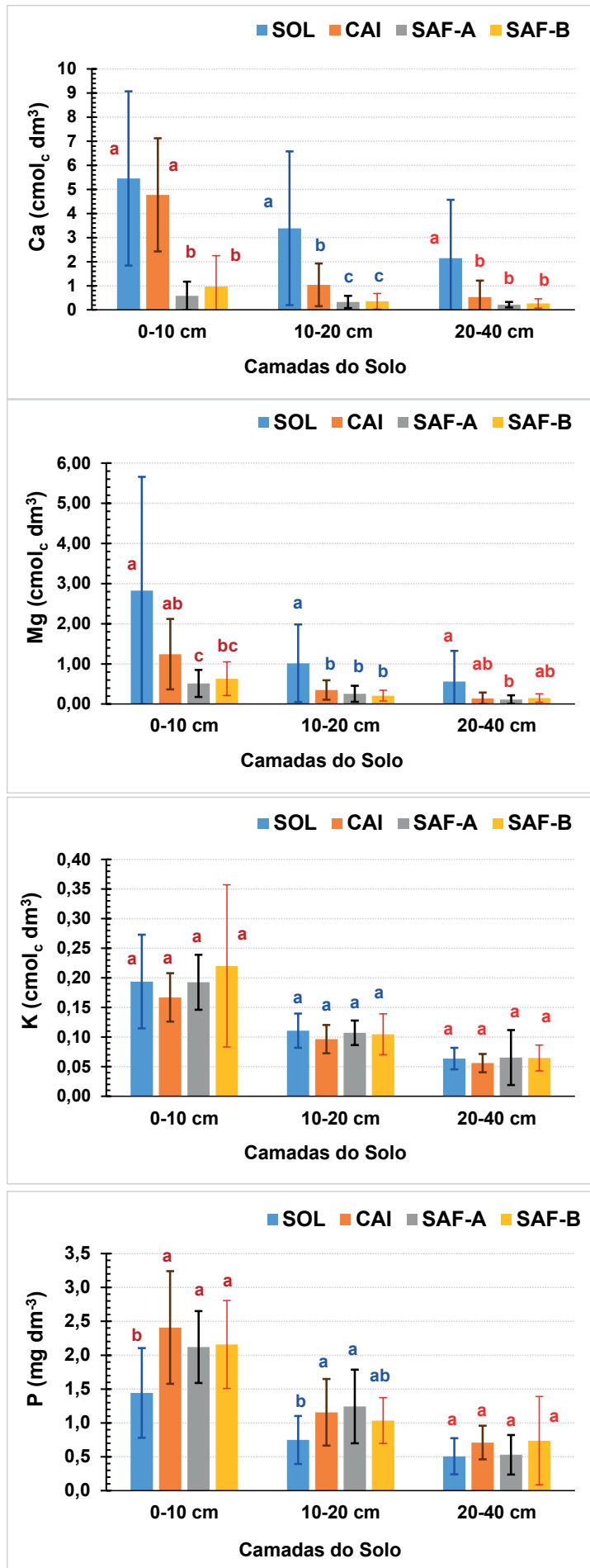


Figura 11. Teores de cálcio, magnésio e potássio disponíveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), e de fósforo disponível (P, em mg dm^{-3}), nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

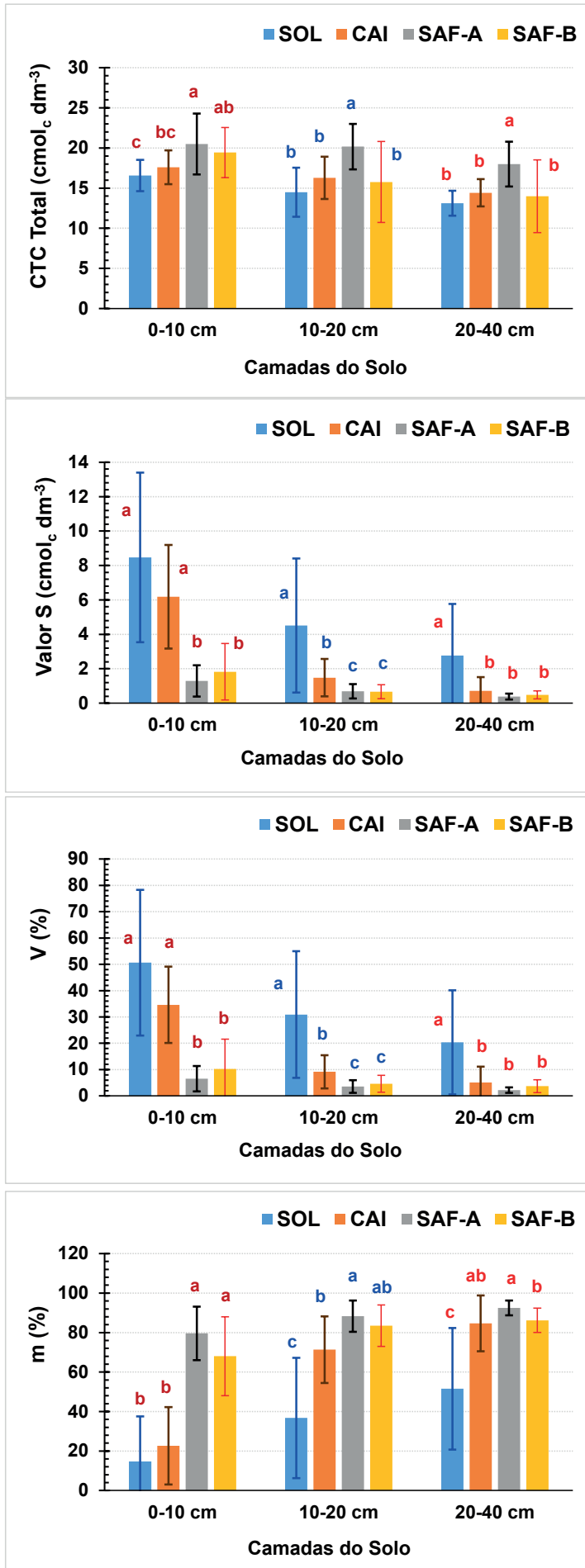


Figura 12. Valores de Capacidade de Troca de Cátions Total, Soma de Bases Trocáveis (CTC Total e Valor S, em cmol_c dm⁻³), e de Percentagem de Saturação por Bases e Percentagem de Saturação por Alumínio (Valor V e m, em %), nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

Os valores de saturação por bases (Valor V) observados refletem a quantidade de bases compondo a CTC total do solo e apresentaram um comportamento semelhante ao observado do Valor S, nos sistemas de produção (Figura 12). O sistema Pleno Sol apresentou os maiores valores de V% no perfil do solo em relação aos outros sistemas, em função do calcário aplicado nesta área (Figura 12). Entretanto, em geral, os solos estudados apresentaram valores de V% muito baixos, que variaram de 2,21% na camada de 20-40 cm no SAF-A até 10,22% na camada de 0-10 cm no SAF-B, e são característicos dos Cambissolos de áreas naturais na região de Bituruna. Na camada de 0-10 cm, as diferenças significativas ($p < 0,05$) do Valor V tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-A (6,54%) \approx SAF-B (10,22%) $<$ Caíva (34,60%) \approx Pleno Sol (50,61%). Na camada de 10-20 cm, as diferenças do Valor V tiveram a seguinte ordem entre os sistemas: SAF-A (3,55%) \approx SAF-B (4,60%) $<$ Caíva (9,16%) $<$ Pleno Sol (30,92%). Na camada de 20-40 cm houve uma diferença significativa ($p < 0,05$) entre Pleno Sol (20,35%) e os outros sistemas que não tiveram diferenças entre eles (valor médio entre eles de 3,67%).

A Capacidade de Troca de Cátions total do solo sob pH 7.0 (CTC total) representa o potencial que os sítios reativos das partículas minerais e orgânicas do solo têm para reter nutrientes a serem disponibilizados para as plantas. O sistema SAF-A apresentou os maiores valores de CTC total no perfil do solo em relação aos outros sistemas de produção, sendo de 20,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-10 cm, de 20,2 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na de 10-20 cm, e de 18,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na de 20-40 cm de profundidade, indicando uma diminuição de 20% entre a camada superficial em relação à camada 20-40 cm (Figura 12). Valores na faixa de 15,1 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a 30,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ são considerados como “altos”, com base nas classes de CTC total na camada 0-20 cm em MANUAL ... (2016). Na camada de 0-10 cm, as diferenças significativas ($p < 0,05$) da CTC total indicaram que não houve diferença entre o SAF-A (20,49 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e o SAF-B (19,43 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), e os menores valores foram no Pleno Sol (16,56 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e na Caíva (17,58 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), embora a Caíva não tivesse diferença com SAF-B (19,43 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Nas camadas de 10-20 cm e 20-40 cm, não houve diferença significativa entre Pleno Sol, Caíva e SAF-B (valores da média entre eles de 15,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 13,8 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), os quais apresentaram diferença em relação aos maiores valores da CTC total do SAF-A.

Teores e estoques de carbono e de nitrogênio totais do solo

O SAF-A apresentou uma maior quantidade de Carbono Total no perfil do solo em relação aos outros sistemas de produção, sendo de 52,2 g kg^{-1} na camada de 0-10 cm, de 41,3 g kg^{-1} na de 10-20 cm, e de 31,5 g kg^{-1} na de 20-40 cm de profundidade, indicando uma diminuição de 21% e de 40% entre a camada 0-10 cm em relação a 10-20 cm e 20-40 cm (Figura 13). Valores acima de 30,0 g kg^{-1} de C total (ou 50,0 g kg^{-1} de matéria orgânica) são considerados como “altos”, com base nas classes de matéria orgânica do solo na camada 0-20 cm em MANUAL ... (2016). Na camada de 0-10 cm, os resultados do C total indicaram que não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre o SAF-A (52,2 g kg^{-1}) e o SAF-B (46,5 g kg^{-1}), e o menor teor ocorreu no Pleno Sol (39,7 g kg^{-1}), sendo que Caíva (46,8 g kg^{-1}) não se diferenciou do SAF-A nem do Pleno Sol. Na camadas de 10-20 cm, não houve diferença significativa entre Pleno Sol (23,2 g kg^{-1}) e SAF-B (25,4 g kg^{-1}), que apresentaram diferença em relação ao maior valor do C total do SAF-A, entretanto, o valor em Caíva (27,4 g kg^{-1}) não teve diferença do Pleno Sol nem do SAF-B.

Os teores de nitrogênio total não tiveram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas SAF-A, SAF-B e Caíva nas três camadas de solos, cujos valores médios desses sistemas foram 4,07 g kg^{-1} (ou 0,4%) na camada de 0-10 cm, de 2,97 g kg^{-1} na de 10-20 cm, e de 2,30 g kg^{-1} na de 20-40 cm de profundidade; sendo que houve diferença com o Pleno Sol nas três camadas, cujos valores foram menores e respectivamente de 3,33 g kg^{-1} , 2,54 g kg^{-1} , e 1,96 g kg^{-1} (Figura 13).

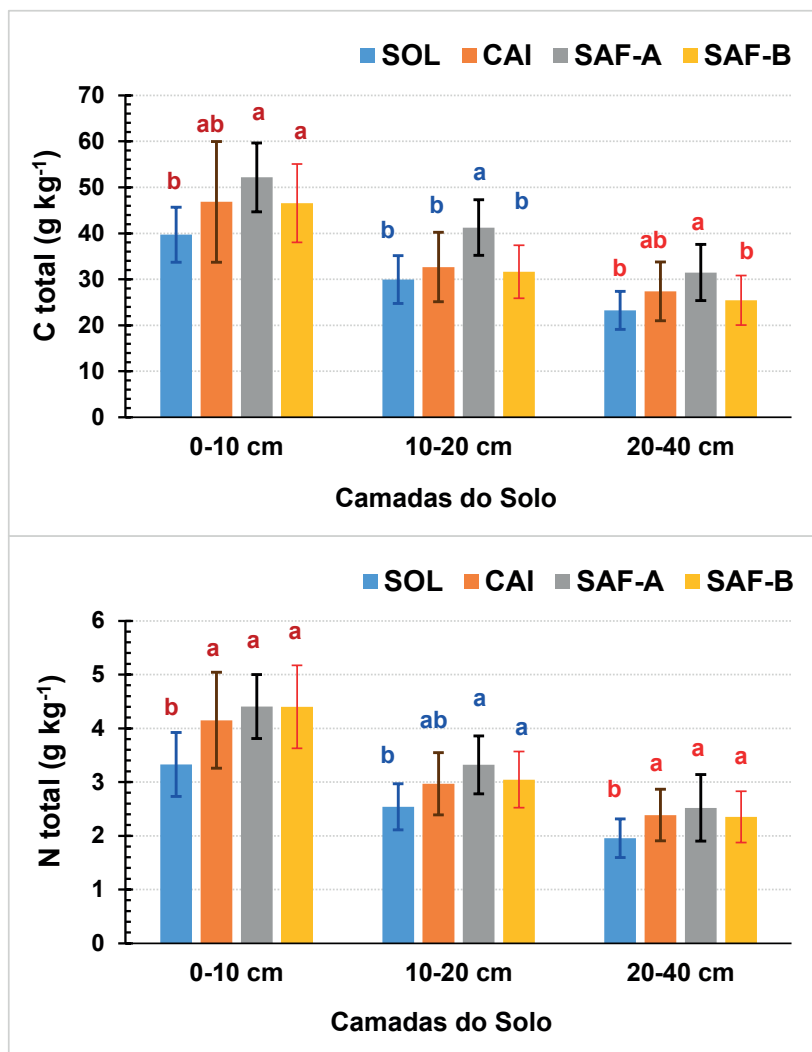


Figura 13. Teores de carbono e de nitrogênio totais do solo (C total e N total, em g kg⁻¹), nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

O estoque de carbono total no solo (Mg ha⁻¹) representa o tamanho da reserva de carbono retido no solo, que varia dependendo do tipo de manejo do solo e uso da terra. Portanto, podendo ser utilizado como um indicador da qualidade do solo e do sistema de produção. Quando comparado com outros sistemas e tendo uma área como referência, pode ser um instrumento para compensação pela prestação de serviços ecossistêmicos, como a redução dos efeitos causados pelos gases de efeito estufa relacionados às alterações do clima.

Não se observou diferenças significativas dos estoques de carbono total do solo (Est-C) entre os perfis de solos (0-40 cm) dos quatro sistemas de produção de erva-mate, que apresentaram os valores de 118 Mg ha⁻¹ para Pleno Sol, 144 Mg ha⁻¹ para Caíva, 139 Mg ha⁻¹ para SAF-A e 125 Mg ha⁻¹ para SAF-B (Figura 14). Entretanto, na camada de 0-10 cm observou-se que Caíva teve o maior valor de Est-C com 51,4 Mg ha⁻¹, o SAF-A teve diferença do Caíva com o segundo maior valor de 41,3 Mg ha⁻¹, e o Pleno Sol com o menor valor também com diferença significativa de 35,2 Mg ha⁻¹; sendo que o SAF-B teve um valor de 43,0 Mg ha⁻¹ que foi intermediário e sem diferença significativa de Caíva e SAF-A (Figura 14). Este resultado mostra que, embora na camada de 0-40 não tenha ocorrido diferença no estoque de C, na camada mais superficial, o sistema mais intensivo de manejo, sob

pleno sol, resulta em perdas de carbono por emissão de CO_2 , comprometendo a sustentabilidade do sistema, e não contribuindo com a mitigação dos efeitos das mudanças do clima.

Para o estoque de nitrogênio total do solo (Est-N) no perfil dos solos (0-40 cm), os resultados indicaram que não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre o SAF-A ($11,3 \text{ Mg ha}^{-1}$), SAF-B ($11,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) e Caíva ($12,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo que Pleno Sol ($9,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) não apresentou diferença do SAF-A, entretanto, teve diferença significativa de SAF-B e Caíva (Figura 14). Na camada de 0-10 cm foi observado o mesmo tipo de comportamento de diferenças entre os sistemas de produção que aquele ocorrido no Est-C, com os valores de $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ em Caíva, de $4,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ em SAF-B, de $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ em SAF-A, e de $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob Pleno Sol. Estes resultados indicam que o sistema de manejo não conservacionista sob pleno sol, também não colabora com a manutenção do nitrogênio no solo, funcionando como fonte de óxido nitroso, um gás com potencial de aquecimento global 265 vezes maior que o do CO_2 .

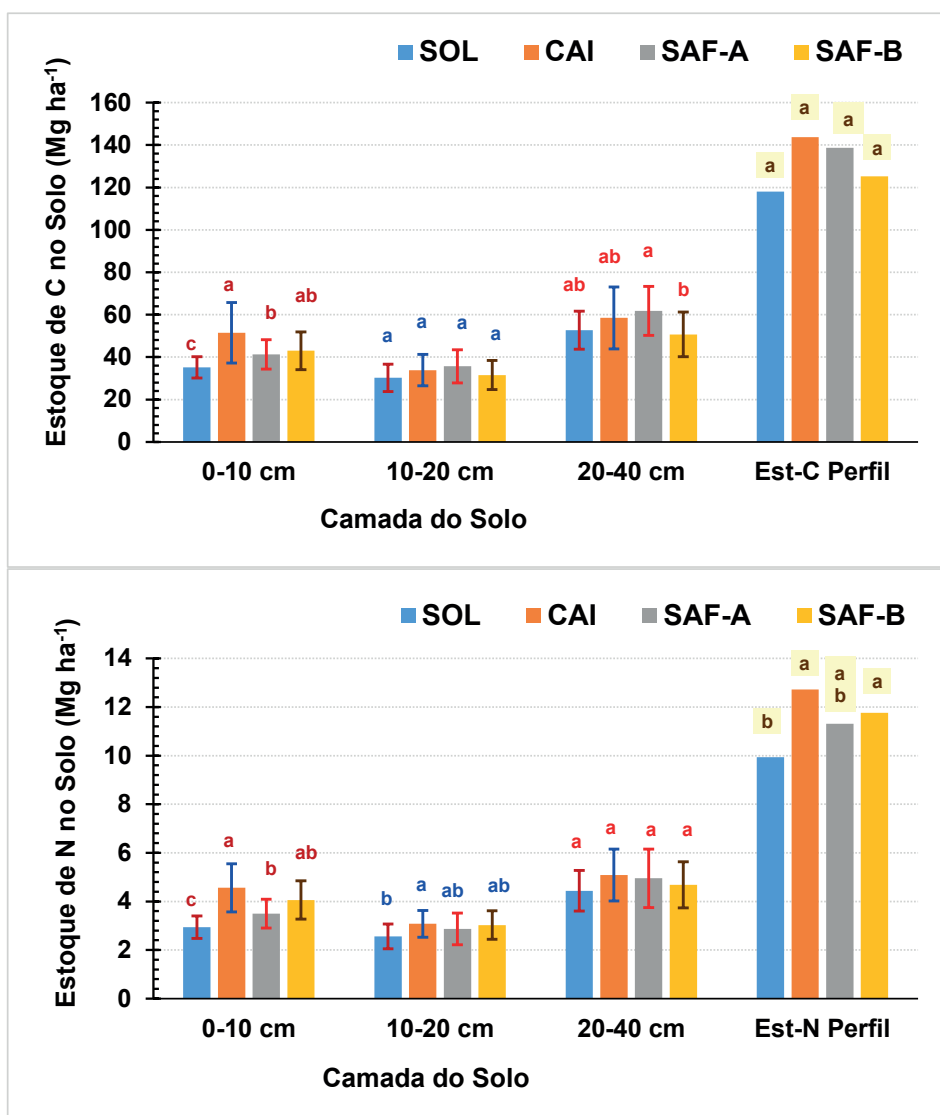


Figura 14. Estoques de carbono e de nitrogênio do solo (Est-C e Est-C, em Mg ha^{-1}) nas camadas do solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, e por perfil do solo (0-40 cm), nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias nas camadas de solo com teste t de Student (5% de probabilidade).

Atributos biológicos dos solos

Densidade, biomassa e riqueza de minhocas

As minhocas são consideradas engenheiros do solo, contribuindo para a formação e manutenção da sua estrutura, mediante a abertura de galerias, a qual interfere não só na aeração e infiltração de água no solo, mas também na formação de novos agregados estáveis no solo com a produção de coprólitos. A interação das partículas minerais e orgânicas do solo com os microrganismos promovida no intestino das minhocas contribui para uma maior disponibilização de nutrientes para as plantas, bem como à produção de substâncias promotoras do crescimento vegetal (Blouin et al., 2013). Portanto, a presença desses organismos demonstra a qualidade e o potencial produtivo do solo.

As minhocas são sensíveis e reagem às mudanças naturais e induzidas ao solo pela atividade humana, podendo ser utilizadas como bioindicadores, demonstrando o estado atual dos ecossistemas e suas mudanças no tempo (Brown; Domínguez, 2010).

Não foram encontradas minhocas no Pleno Sol e não houve diferença significativa ($p < 0,05$) na densidade nem na biomassa das minhocas entre os sistemas, sendo encontrados respectivamente 5 indivíduos m^{-2} e 26 $g m^{-2}$ no SAF-A, 6 ind. m^{-2} e 7 $g m^{-2}$ no SAF-B e 21 ind. m^{-2} e 2 $g m^{-2}$ em Caíva (Tabela 3). As diferenças nos valores de densidade e biomassa em cada sistema se deve às diferentes características morfológicas (por exemplo, tamanho) das espécies predominantes em cada sistema de produção.

Em relação à riqueza de minhocas (Tabela 3), o sistema Caíva apresentou três espécies. Esse resultado pode estar relacionado com a integração de erva-mate e gado de leite, que promove a cobertura do solo com o pasto e o esterco de gado sendo distribuído durante o pastejo, proporcionando um ambiente favorável para a manutenção e proliferação das minhocas.

As minhocas coletadas foram classificadas em quatro espécies, sendo uma nativa da família *Glossoscolecidae* (*Fimoscolex* n.sp.24), duas nativas das espécies *Urobenus brasiliensis* e *Andiorrhinus dusei*, e uma espécie exótica da família *Rhinodrilidae* (*Pontoscolex corethrurus*) (Figura 15).

Tabela 3. Densidade (Nº indivíduos m^{-2}), Biomassa ($g m^{-2}$, em peso fresco) e Riqueza (qtd. sp.) de minhocas presentes na camada do solo de 0-20 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR.

Sistemas de Produção	SOL *	CAI	SAF-A	SAF-B
Densidade (ind. m^{-2})	0	21 ± 18 ***	5 ± 8	6 ± 8
Biomassa ($g m^{-2}$)	0	2 ± 4	26 ± 41	7 ± 15
Riqueza (qtd. sp.)	0	3 (F, U, P) **	2 (A, U)	2 (U, A)

* Sistemas de produção: Pleno Sol; Caíva; SAF-A - Sistema Agroflorestal tipo A; SAF-B - Sistema Agroflorestal tipo B. ** Espécies de minhocas encontradas: (A) *Andiorrhinus dusei*, (F) *Fimoscolex* n.sp.24; (P) *Pontoscolex corethrurus*; (U) *Urobenus brasiliensis*. *** Valor da média ± intervalo de confiança (5% de probabilidade).



Figura 15. Espécies de minhocas encontradas nos diferentes sistemas de produção de erva-mate: (A) *Urobenus brasiliensis*; (B) *Fimoscolex* n.sp.24; (C) *Andiorrhinus duseni* adulta; (D) *A. duseni* e coprólitos; (E) *Pontoscolex corethrurus*.

No sistema SAF-A a espécie *Andiorrhinus duseni* (Figura 15C) teve maior representação, com 67% da abundância relativa, seguida da *Urobenus brasiliensis* (Figura 15A), com 33% de abundância (Figura 16). As mesmas foram encontradas no SAF-B, porém a maior abundância foi de *U. brasiliensis* (75%). Essas minhocas podem ser consideradas indicadores de ecossistemas mais bem preservados, como mata nativa, e, ou com uma densa camada de serapilheira.

A. duseni, que pode alcançar 40 cm de comprimento (Feijoo et al., 2017), é endogêica que consome solo e faz grandes galerias com coprólitos dentro do perfil do solo (Figura 15D), sendo frequente em áreas de Floresta com Araucária (Brown; Gabriac, 2021).

Já *U. brasiliensis* é epi-endogêica, que habita as camadas superiores do solo, e está associada à presença de serapilheira na superfície do solo, em florestas ou fragmentos de florestas primárias e secundárias (Sautter et al., 2006; Bartz et al., 2011). Ingera solo e matéria orgânica fresca, atuando como catalisadora da decomposição de resíduos orgânicos e promotora da agregação do solo superficial (0-10 cm de profundidade).

A ocorrência de ambas as espécies está associada aos ambientes de baixa perturbação, em comparação às áreas com práticas agrícolas, ainda que elas têm sido encontradas em baixa abundância, em áreas com plantio direto nos estados do Paraná e Santa Catarina (Brown, James, 2007; Bartz et al., 2011; Feijoo et al., 2017). Os sistemas agroflorestais tendem a apresentar maior ocorrência de minhocas em função do sombreamento proporcionado pelas árvores, mais baixas temperaturas do solo, maior umidade, e maior quantidade de alimentos (Araújo; López-Hernández, 1999).

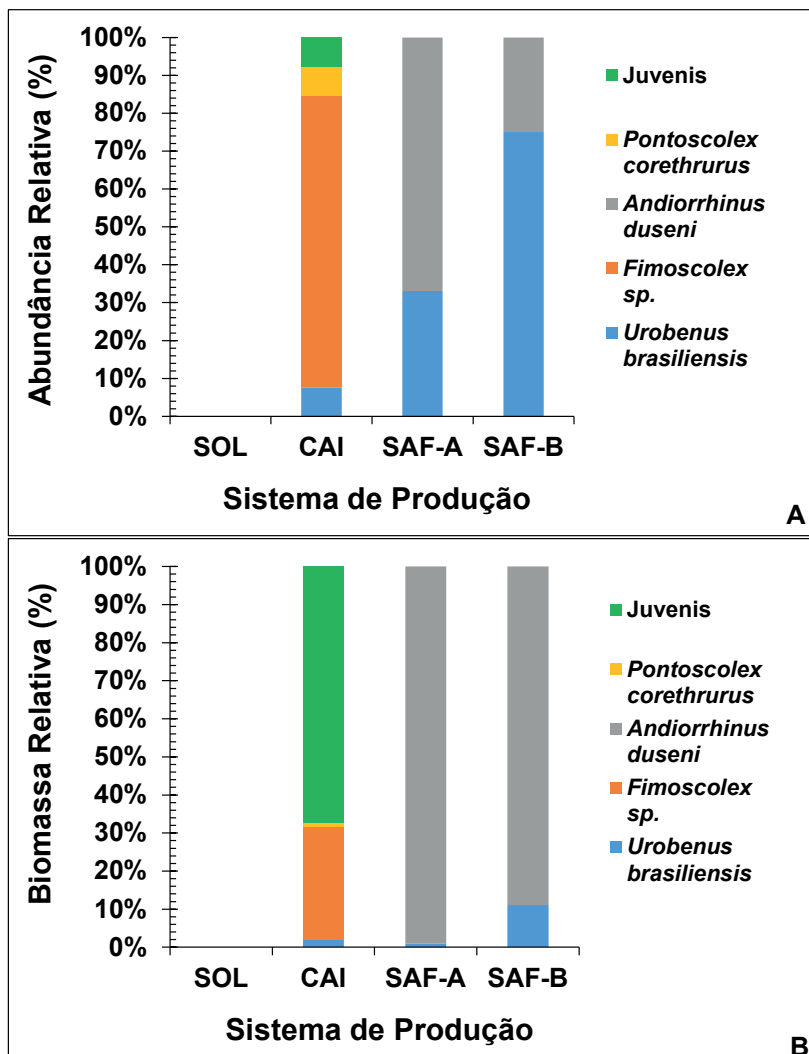


Figura 16. (A) Abundância relativa (%) das diferentes espécies de minhocas, e (B) Biomassa relativa (%) das diferentes espécies de minhocas, na camada do solo de 0-20 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B).

No sistema Caíva foi observada maior riqueza de minhocas (Figura 17), e dentre essas, 77% eram de *Fimoscolex* sp. (Figura 15B), e 8% de *P. corethrurus*, *U. brasiliensis*, e de minhocas juvenis, respectivamente (Figura 16A). O gênero *Fimoscolex* possui onze espécies descritas e, no Brasil, apresenta distribuição restrita às regiões Sul e Sudeste (Feijoo; Brown, 2018). São geralmente espécies pequenas e endogêicas como a *Fimoscolex bartzi*, que mede 4 cm a 6 cm de comprimento, mas também há espécies que habitam as bromélias da Floresta Atlântica Úmida da Serra do Mar (por exemplo, *Fimoscolex ohausi*). Elas produzem galerias finas e compridas nas camadas superficiais do solo (0-20 cm de profundidade), e pequenos coprólitos arredondados ou amorfos. Sua ecologia é pouco conhecida e ainda não há trabalhos publicados sobre os impactos dessas espécies sobre o solo.

A espécie *Pontoscolex corethrurus* (Figura 15E), comumente conhecida como a minhoca mansa, é uma das espécies mais comuns e abundantes no Brasil (James et al., 2019) e no mundo (Taheri et al., 2018), sendo geralmente associada aos ambientes antrópicos como jardins, pastagens, e florestas secundárias, especialmente no bioma da Mata Atlântica (Brown et al., 2007), mas também na Amazônia (Marichal et al., 2010). Ambientes desmatados ou que passaram por transformações antrópicas são suscetíveis à invasão de *P. corethrurus* e, muitas vezes, esta espécie acaba se tornando dominante (Barros et al., 2004), influenciando a permanência de espécies nativas no local (Lapied; Lavelle, 2003). Este comportamento pode estar relacionado com a sua alta tolerância e adaptabilidade aos diferentes tipos de solo e habitats. No presente estudo, essa espécie esteve presente apenas na Caíva e em menor abundância que a *Fimoscolex* sp. (Figura 16A), indicando sua provável menor adaptação a esse hábitat, em comparação com a espécie nativa. A espécie *P. corethrurus* possui ecologia bem conhecida e tem sido associada a importantes efeitos positivos sobre a fertilidade do solo e a produtividade de diversas culturas agrícolas (Brown et al., 1999; Braga et al., 2016). Esse é o primeiro registro dessa espécie em áreas de produção de erva mate.

A biomassa relativa das minhocas presentes nos diferentes sistemas de produção está representada na Figura 16B. No sistema SAF-A, apesar dos organismos encontrados pertencerem a duas espécies, quase a totalidade da biomassa (99%) foi da espécie *Andiorrhinus duseni*. O mesmo comportamento foi observado no tratamento SAF-B, com maior biomassa relativa de *A. duseni* (89%), seguida de *Urobenus brasiliensis* (11%). No sistema Caíva a maior biomassa relativa (70%) foi de minhocas juvenis, seguidas de *Fimoscolex* sp. (31%), *U. brasiliensis* (2%) e *Pontoscolex corethrurus* (1%).

Carbono da biomassa microbiana, respiração e atividade enzimática

O sistema Caíva apresentou maiores valores de carbono da biomassa microbiana (C-BMS) (Figura 17). Para os SAFs A e B e o cultivo sob Pleno Sol, os valores de C-BMS não variaram, sendo estatisticamente similares. No entanto, foi possível observar uma tendência de maior valor de C-BMS dos SAFs comparados ao sistema Pleno Sol. Os SAFs juntamente com o sistema Caíva são sombreados por fragmentos de florestas que, conseqüentemente, fornecem um maior aporte de matéria orgânica ao solo. Considerando que o C-BMS é a parte viva e mais ativa da matéria orgânica, responsável pela mineralização de nutrientes (Reis Junior; Mendes, 2007), trata-se de um indicador importante na avaliação dos diferentes sistemas de cultivo. Em relação à respiração basal do solo (RBS) foi observado que o SAF-A apresentou maiores valores que o SAF-B e a erva-mate cultivada sob Pleno Sol. A razão entre a RBS e o C-BMS fornece o quociente metabólico (qCO_2). O qCO_2 foi maior no sistema SAF-A e Pleno Sol, seguidos de SAF-B e Caíva. Isso indica que os sistemas SAF-B e Caíva estão perdendo menos CO_2 para a atmosfera e incorporando mais carbono na biomassa microbiana. Para o quociente microbiano ($qMIC$), que é a relação entre C-BMS e o C orgânico total, o sistema Caíva se destacou dos demais tratamentos, indicando que neste sistema é maior a quantidade de carbono orgânico que está sendo imobilizado na biomassa microbiana, podendo promover uma melhor ciclagem de nutrientes.

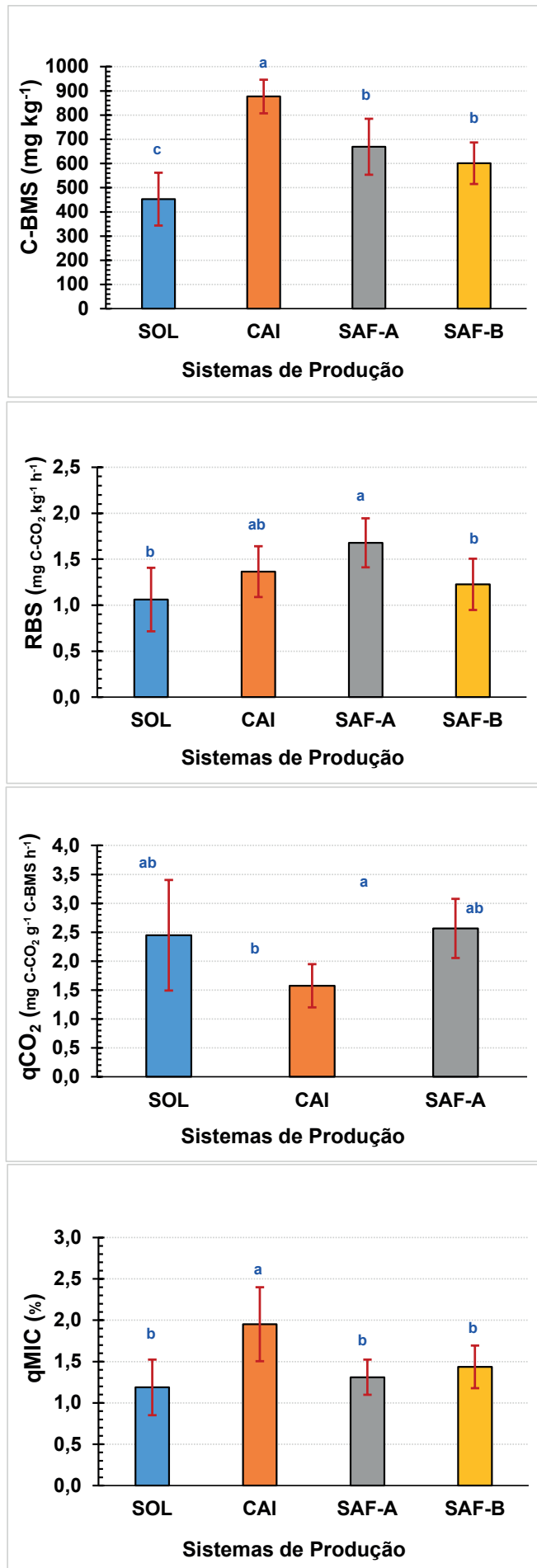


Figura 17. Carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2) e quociente microbiano (qMIC), na camada do solo de 0-10 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

A atividade enzimática microbiana nos diferentes sistemas de cultivo de erva-mate também apresentou variações. A Beta-glucosidase apresentou uma maior atividade no SAF-A, tendo 243,49 mg de p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹, sendo estatisticamente superior aos demais tratamentos (Figura 18). Apesar de para os demais tratamentos, não haver diferenças significativas, foi possível observar uma tendência de uma atividade maior no SAF-B, seguido pelo sistema Caíva e Pleno Sol, com valores de 181,89 mg de p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹, 161,27 mg de p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹ e 155,81 mg de p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente. A Beta-glucosidase está envolvida nas etapas finais de degradação de celulose e é uma enzima sensível para alterações no manejo do solo. Essa enzima está estritamente relacionada ao teor de carbono e, conseqüentemente, na ciclagem de nutrientes, sendo um indicador sensível de alterações de manejo no solo.

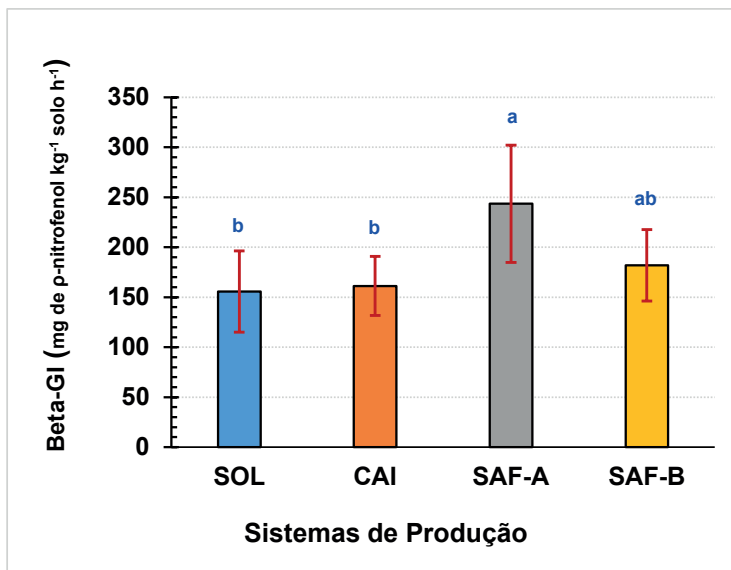


Figura 18. Atividade da enzima Beta-glucosidase na camada do solo de 0-10 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

Quanto à atividade da urease (Figura 19), os valores variaram de 148,71 µg de NH₄-N g de solo⁻¹ 2 h⁻¹ a 85,35 µg de NH₄-N g de solo⁻¹ 2 h⁻¹. Os tratamentos SAF-A, SAF-B e Caíva foram similares quanto à atividade enzimática, com valores de 148,71 µg de NH₄-N g de solo⁻¹ 2 h⁻¹, 146,16 µg de NH₄-N g de solo⁻¹ 2 h⁻¹ e 136,57 µg de NH₄-N g de solo⁻¹ 2 h⁻¹, respectivamente. O tratamento onde a erva mate é cultivada sob Pleno Sol apresentou menor atividade dessa enzima, com 85,35 µg de NH₄-N g de solo⁻¹ 2 h⁻¹. A atividade da urease fornece uma indicação do potencial do solo em transformar nitrogênio orgânico em mineral, isto é, potencial de mineralização do nitrogênio.

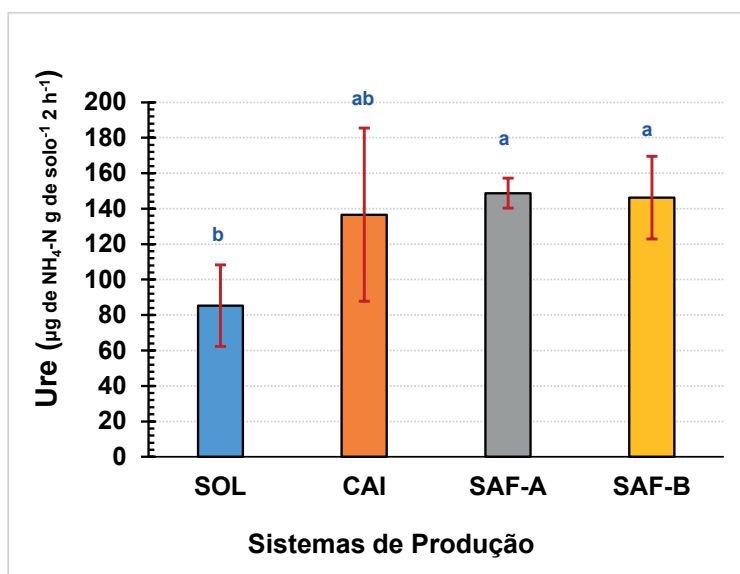


Figura 19. Atividade da enzima urease na camada do solo de 0-10 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

Para a atividade da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) (Figura 20), o sistema SAF-A apresentou maiores valores, seguidos de SAF-B e Caíva, e por último o cultivo de erva-mate sob Pleno Sol. Os tratamentos SAF-A, SAF-B e Caíva apresentaram valores de $9,19 \mu\text{g de FDA g de solo}^{-1} \text{h}^{-1}$, $8,14 \mu\text{g de FDA g de solo}^{-1} \text{h}^{-1}$ e $7,0 \mu\text{g de FDA g de solo}^{-1} \text{h}^{-1}$, respectivamente. Onde o solo foi cultivado com erva-mate sob Pleno Sol, entretanto, a atividade foi de $4,99 \mu\text{g de FDA g de solo}^{-1} \text{h}^{-1}$. Assim como ocorrido na urease, o sistema de cultivo sob Pleno Sol apresentou redução da hidrólise do FDA. O FDA é hidrolisado por várias enzimas de células vivas, de modo que quanto maior a sua atividade, maior será a atividade microbiana.

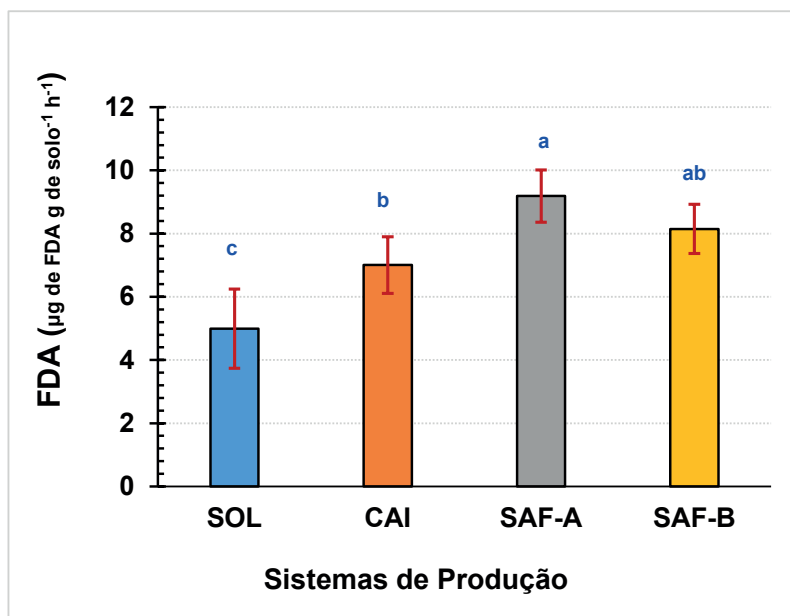


Figura 20. Atividade de hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) na camada do solo de 0-10 cm, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

A atividade microbiana, avaliada pela atividade enzimática, está intimamente relacionada ao conteúdo de carbono orgânico presente no solo (Lopes et al., 2013). Isto foi observado no sistema sob Pleno Sol, que apresenta menor teor de carbono orgânico e, conseqüentemente, menor atividade microbiana. Assim, sistemas de cultivo que priorizem o incremento de carbono no solo são importantes para a manutenção da atividade microbiana e, conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes. Além do teor de carbono, a qualidade química do resíduo vegetal também modula a atividade microbiana, tendo impacto direto no aumento da atividade enzimática da Beta-glucosidase e urease (Almagro et al., 2021). Ou seja, nos sistemas agroflorestais e de Caíva, o componente arbóreo com a presença de *Araucaria angustifolia* pode estar modulando a atividade microbiana em relação à dinâmica de transformação entre o potencial de acúmulo de serapilheira e da disponibilidade de nutrientes no solo, promovida pela decomposição gradativa dos resíduos orgânicos sendo depositados, dependendo das condições ambientais regionais e do manejo do agricultor.

Produção e estoques de nutrientes da serapilheira

A produção de serapilheira foi maior em SAF-B com $7,83 \text{ Mg ha}^{-1}$, seguido de SAF-A com $4,95 \text{ Mg ha}^{-1}$ que não apresentou diferença significativa do Pleno Sol com $5,66 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo que Caíva teve a menor produção de serapilheira com $2,39 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 22). Em geral, a quantidade de serapilheira acumulada pode estar diretamente relacionada com a quantidade de árvores que compõem o sistema agroflorestal com erva-mate, conforme pode ser observado na Figura 21. Por outro lado, o acúmulo elevado de cobertura morta no sistema sob Pleno Sol ($5,66 \text{ Mg ha}^{-1}$) também tem como fonte outras espécies vegetais que não são árvores, as que compõem o estrato herbáceo

e arbustivo ou material orgânico proveniente do manejo da roçada, cuja produção de biomassa é favorecida por uma condição melhor de fertilidade do solo.

A quantidade de serapilheira acumulada encontrada no SAF-A e SAF-B corresponde aos valores encontrados em outros trabalhos, tanto em sistemas agroflorestais com erva-mate como em Florestas com Araucária (ou FOMM) na região de Bituruna e no centro-sul do Paraná. Diferentes estudos encontraram valores de $5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ a $11,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ em Florestas Ombrófilas na região Sul do Brasil (Figueiredo Filho et al., 2005; Caldeira et al., 2007, 2008; Longhi et al., 2011). Santos (2009) coletou, em junho de 2008, também na área do SAF-A, a serapilheira acumulada (folhas, ramos finos e miscelâneas) sobre o solo e a biomassa (folhas e ramos) do estrato herbáceo/arbustivo (com Perímetro à Altura do Peito (PAP) inferiores a 15 cm) da regeneração natural que foi cortada simulando a roçada realizada todos os anos no SAF-A, e obtiveram respectivamente $7,09 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $2,01 \text{ Mg ha}^{-1}$, que totalizaram $9,1 \text{ Mg ha}^{-1}$. Machado et al. (2021), em coletas de serapilheira depositada pelo estrato arbóreo realizadas mensalmente a partir de outubro de 2011, obtiveram valores de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na área do SAF-A e de $6,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na área do SAF-B, sendo que, em média, as folhas, galhos e miscelâneas representaram, respectivamente, cerca de 70%, 25% e 5%. Neste trabalho os autores também estimaram a contribuição do manejo da roçada do estrato herbáceo/arbustivo de $1,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no SAF-A e de $1,4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no SAF-B, que, somando ao aporte arbóreo da serapilheira, totalizaram respectivamente $6,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $8,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

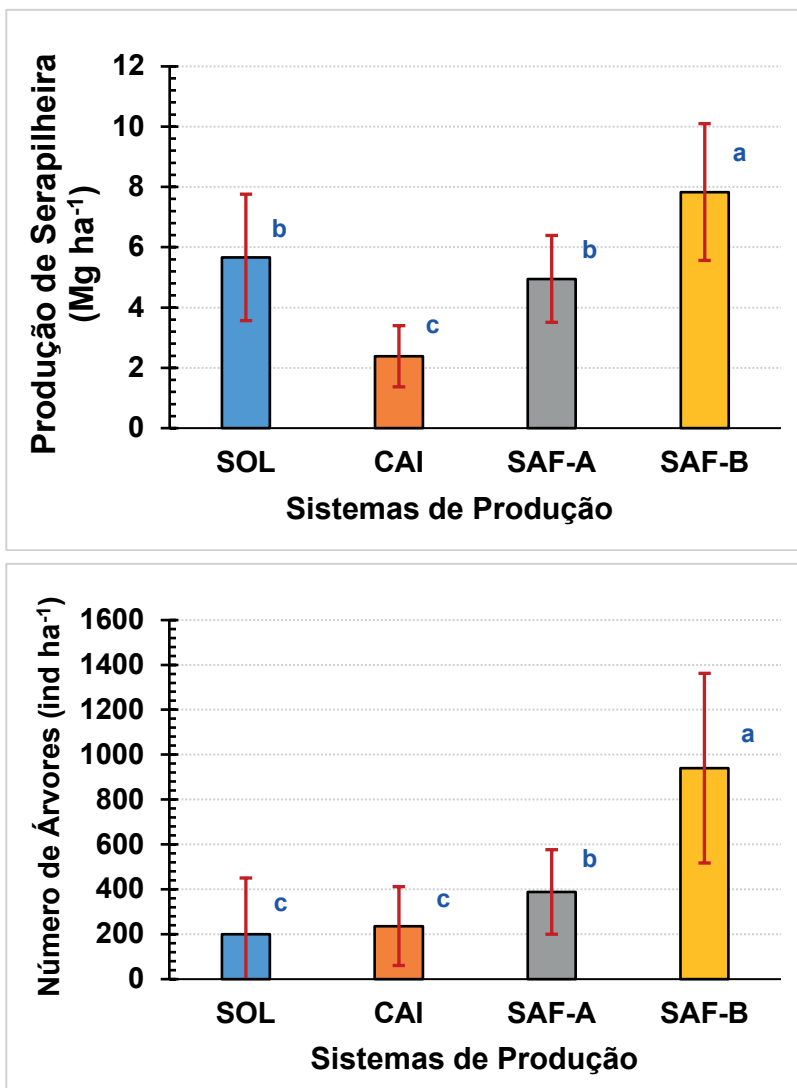


Figura 21. Produção de serapilheira (Mg ha^{-1}) e quantidade de árvores ($\text{indivíduos ha}^{-1}$) nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

Como o carbono (C) é o principal componente da matéria orgânica e o ciclo do nitrogênio (N) está diretamente relacionado com o ciclo do C, embora em menor quantidade, a quantidade tanto do C como do N por hectare reflete e está diretamente relacionada com a quantidade de serapilheira acumulada, conforme pode ser observado nas figuras 21 e 22. Consequentemente, as diferenças significativas observadas na produção de serapilheira entre os sistemas de produção tiveram o mesmo comportamento na quantidade acumulada de C e N na serapilheira, por hectare, os quais representam os estoques desses elementos ou reservas com menor tempo de duração, em função do processo de transformação da matéria orgânica, em cada sistema de produção. A quantidade de C foi maior em SAF-B com $3,36 \text{ Mg ha}^{-1}$, seguido de SAF-A com $2,08 \text{ Mg ha}^{-1}$ que não apresentou diferença significativa do Pleno Sol com $1,90 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo que Caíva teve a menor quantidade de C com $1,02 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 23). A quantidade de N foi maior em SAF-B com $150,6 \text{ kg ha}^{-1}$, seguido de SAF-A com $84,3 \text{ kg ha}^{-1}$ que não apresentou diferença significativa do Pleno Sol com $84,5 \text{ kg ha}^{-1}$, e Caíva teve a menor quantidade de N com $32,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 22).

A relação C/N da serapilheira é um indicador do grau de dificuldade da matéria orgânica se transformar e se decompor mediante ação dos organismos do solo. Em geral, uma relação C/N em torno de 30 é considerada ideal para que a decomposição dos resíduos orgânicos aconteça sem limitação de nitrogênio. Portanto, o conhecimento da relação C/N de um material orgânico reflete o grau de resistência e o tempo necessário para a sua decomposição.

Na figura 22 pode-se observar que a serapilheira no sistema Caíva tinha a maior relação C/N (de 32,8), que teve diferença significativa do SAF-A com C/N igual a 25,5, que foi diferente dos menores valores de C/N encontrados em SAF-B (de 22,6) e Pleno Sol (de 22,7).

A quantidade de fósforo (P) armazenado na serapilheira acumulada por hectare foi maior em SAF-B com $8,7 \text{ kg ha}^{-1}$, que não apresentou diferença significativa do Pleno Sol com $7,0 \text{ kg ha}^{-1}$, seguido com diferença de SAF-A com $4,9 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo que Caíva teve a menor quantidade de P com $2,8 \text{ kg ha}^{-1}$ armazenado na serapilheira (Figura 22). Os perfis dos solos em todos os sistemas de produção têm níveis muito baixos de P disponível (valores médios dos perfis de $0,9 \text{ mg dm}^{-3}$ em Pleno Sol, $1,4 \text{ mg dm}^{-3}$ em Caíva, $1,3 \text{ mg dm}^{-3}$ em SAF-A e SAF-B) (Figura 11). Com isso, torna-se perceptível a importância das árvores nos sistemas agroflorestais com erva-mate para reciclar o P, tanto das camadas superiores do solo (0-40 cm) como de camadas mais profundas do solo (em geral com a ajuda de fungos micorrízicos associados ao sistema radicular). Ao mesmo tempo, o P pode se acumular na forma orgânica na serapilheira e, ao se decompor, disponibilizar-se gradativamente para as plantas na camada superficial do solo. Isto pode ser observado na Figura 11, na camada de solo de 0-10 cm, nos valores maiores e sem diferença entre SAF-A, SAF-B e Caíva, mas que se diferiram de Pleno Sol com o menor valor de P. Portanto, o P armazenado na forma orgânica na serapilheira fica protegido de ser fixado pelos minerais do solo, bem como em qualquer outra estratégia de manejo da fertilidade do solo com aplicação de adubos orgânicos ou adubos verdes.

Da mesma forma observada para a quantidade de N armazenado na serapilheira, por hectare, também ocorreu com o potássio (K) e o enxofre (S) estocado na serapilheira (Figura 23). O SAF-B teve os maiores estoques de K (com $16,7 \text{ kg ha}^{-1}$) e de S (com 9 kg ha^{-1}), seguido de SAF-A com $10,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de K e com $5,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de S e que não apresentou diferença significativa do Pleno Sol com $10,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K e com $5,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de S, sendo que Caíva teve a menor quantidade de N com $3,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de K e com $3,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de S na serapilheira (Figura 23).

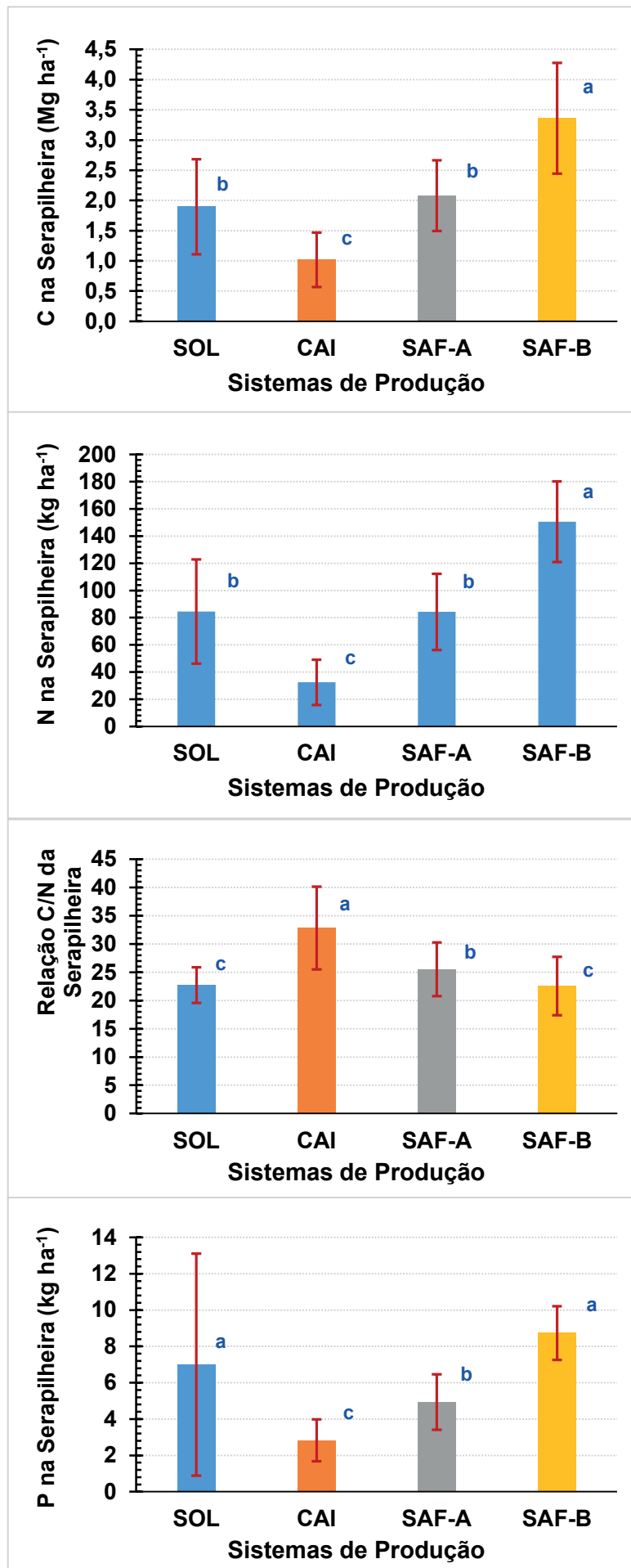


Figura 22. Estoques de carbono (C em Mg ha⁻¹), nitrogênio e fósforo (N e P em kg ha⁻¹), na serapilheira, e Relação C/N da serapilheira, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

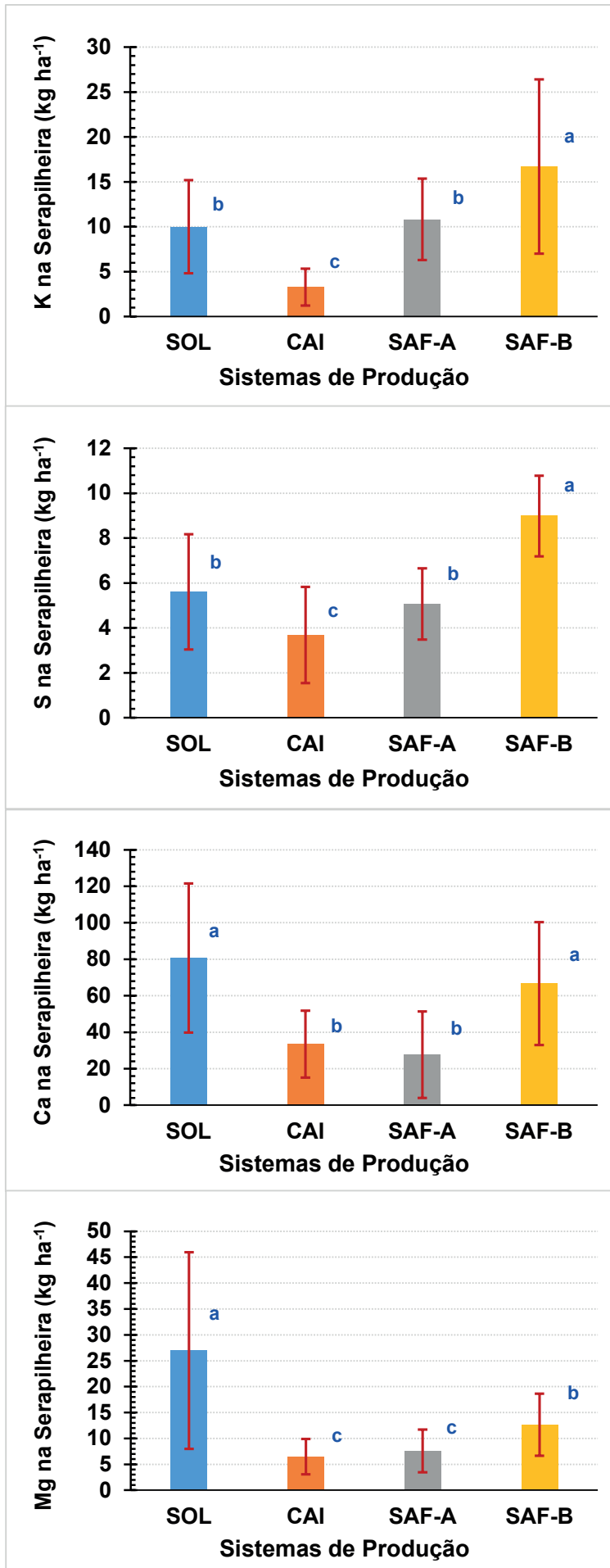


Figura 23. Estoques de potássio – K, enxofre – S, cálcio – Ca e magnésio – Mg (kg ha⁻¹) na serapilheira, nos diferentes sistemas de produção com erva-mate, na região de Bituruna, PR (SOL: Pleno Sol; CAI: Caíva; SAF-A: Sistema Agroflorestal – tipo A; SAF-B: Sistema Agroflorestal – tipo B). Barras verticais: Desvio Padrão; Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

Entretanto, a quantidade de cálcio (Ca) armazenada na serapilheira e acumulada por hectare foi maior em Pleno Sol com $80,6 \text{ kg ha}^{-1}$, que não apresentou diferença significativa do SAF-B com $66,6 \text{ kg ha}^{-1}$, indicando que, no Pleno Sol, a vegetação espontânea está contribuindo para reciclar o Ca do calcário aplicado, enquanto que, no SAF-B, a maior quantidade de árvores no sistema agroflorestal (Figura 21) está extraíndo o Ca do perfil do solo e armazenando-o na serapilheira acumulada em maior quantidade. O SAF-A apresentou a menor quantidade de cálcio, com $27,7 \text{ kg ha}^{-1}$ estocado na serapilheira, mas não apresentou diferença significativa do sistema Caíva com $33,5 \text{ kg ha}^{-1}$, indicando a contribuição para reciclagem de Ca do solo pela segunda maior quantidade de árvores e de serapilheira no SAF-A, e do efeito residual do esterco de gado no sistema Caíva, compensando sua menor quantidade de árvores e de serapilheira acumulada por hectare (Figura 23).

O estoque de magnésio (Mg) na serapilheira (Figura 23) foi maior no Pleno Sol com 27 kg ha^{-1} , que teve diferença significativa do SAF-B com $12,6 \text{ kg ha}^{-1}$, indicando que no Pleno Sol a vegetação espontânea está contribuindo para reciclar o Mg do calcário dolomítico aplicado, enquanto que, no SAF-B, a maior quantidade de árvores no sistema agroflorestal (Figura 21) está extraíndo o Mg do perfil do solo e armazenando-o na serapilheira acumulada em maior quantidade. O SAF-A (com $7,6 \text{ kg ha}^{-1}$) e Caíva (com $6,5 \text{ kg ha}^{-1}$) não mostraram diferença significativa entre eles, e apresentaram os menores estoques de Mg na serapilheira (Figura 23).

A quantidade total de nutrientes estocados na serapilheira ($\text{Est-Nutr-Ser} = \text{N} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{P} + \text{S}$, em kg ha^{-1}) indica o potencial de ciclagem de nutrientes nos sistemas de produção estudados, que seguiu a ordem SAF-B com $264,3 \text{ kg ha}^{-1} \approx$ Pleno Sol com $214,7 \text{ kg ha}^{-1} >$ SAF-A com $140,4 \text{ kg ha}^{-1} >$ Caíva com $82,2 \text{ kg ha}^{-1}$; lembrando que, no Pleno Sol, houve aplicação de calcário e fertilizantes minerais.

O SAF-B apresentou o maior acúmulo de material orgânico cobrindo o solo, bem como a maior quantidade de nitrogênio armazenado (estocado) na serapilheira que, pelo valor da C/N de 22,6, indica que a decomposição desses resíduos orgânicos ocorre normalmente, portanto com maior potencial de fornecimento gradativo de nutrientes para a erva-mate. Esses dados contrastam com a serapilheira no sistema Caíva que apresentou as menores quantidades de material orgânico acumulado e de N armazenado, e com a maior relação C/N (32,8). Por outro lado, as serapilheiras do SAF-A e do Pleno Sol estariam numa condição intermediária em relação à quantidade de material orgânico acumulado cobrindo o solo, de N armazenado e da C/N com 25,5 (SAF-A), exceto a relação C/N de 22,7 do Pleno Sol que também foi baixa como no SAF-B.

O acúmulo de material orgânico na superfície do solo caracterizado pela serapilheira e a dinâmica de sua decomposição promovida pelos organismos compõem um processo ecológico de ciclagem de nutrientes nos sistemas agroflorestais com erva-mate que, dependendo do sistema de manejo, pode eliminar ou minimizar a necessidade de aplicação de calcário e fertilizantes minerais.

Avaliação da qualidade do solo e provimento de serviços ecossistêmicos

O uso e manejo inadequado da terra impactam as propriedades do solo, afetando a sustentabilidade e a capacidade dos sistemas de entregar serviços ecossistêmicos (Hassan et al., 2005; MEA, 2005; Prado et al., 2016; Kuyah et al., 2017; Ferraz et al., 2019a, 2019b).

Os nove indicadores selecionados para expressar a qualidade do solo nas condições desse estudo foram: capacidade de troca de cátions (CTC), fósforo disponível no solo (P), produção acumulada de serapilheira (Prod-Ser), estoque de Nutrientes na serapilheira (Nutr-Ser, $\text{N} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{P} + \text{S}$), estoque de carbono total no solo (Est-Ct), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano (qMlc), atividade microbiana (FDA) e densidade do solo (DS).

Uma correspondência entre os indicadores de qualidade do solo selecionados e os serviços ecossistêmicos a eles associados, com base em De Groot et al. (2010), é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Relação entre os indicadores de qualidade do solo e o provimento de serviços ecossistêmicos.

Indicadores de qualidade do solo	Serviços ecossistêmicos
Capacidade de troca de cátions (CTC)	Fertilidade do solo
Fósforo (P)	Fertilidade do solo
Produção de serapilheira (ProdS)	Ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo
Nutrientes na serapilheira (NutrS)	Ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo
Estoques de carbono (TOC)	Sequestro de carbono, fertilidade do solo
Quociente metabólico (qCO ₂)	Sequestro de carbono
Quociente microbiano (qMlc)	Saúde do solo
Atividade microbiana (FDA)	Saúde do solo
Densidade do solo (DS)	Controle de erosão

Os diagramas de radar mostrados na Figura 24 permitem avaliar qualitativamente (visualmente a área do diagrama) a qualidade do solo em cada sistema de produção, bem como quantitativamente o valor relativo de cada indicador de qualidade (em seu eixo), em cada sistema de produção.

A abordagem utilizada, bastante simplificada, pode não representar todo o status das funções do solo porque interações entre diferentes atributos podem coexistir. Essa avaliação mostra que os diagramas que apresentaram maior área são SAF-A e SAF-B, então, nesses dois sistemas produtivos, há maior provisão de serviços ecossistêmicos do solo. Portanto, danos ou melhorias no solo induzidas por atividades agrícolas implicam em quão sustentáveis são os sistemas produtivos e são refletidas na sociedade e na economia (Adhikari; Hartemink, 2016; Pereira et al., 2018).

A Figura 25 apresenta o valor da área total do diagrama de radar (Figura 24), permitindo fazer uma avaliação quantitativa da qualidade do solo em cada sistema de produção. Indica diferença na qualidade do solo entre Pleno Sol (258 cm²) e Caíva (256 cm²), em relação ao SAF-A (293 cm²) e ao SAF-B (311 cm²) que apresentaram melhores condições de qualidade do solo, respectivamente, com 14% e 21% a mais de quantidade relativa do conjunto de indicadores (área radar total em cm²) para expressão das funções do solo.

A Tabela 5 mostra os valores da quantidade relativa (área radar em cm²) de cada indicador de qualidade do solo, que permite verificar a contribuição diferenciada dos indicadores em cada sistema, ou entre os sistemas de produção.

Esse tipo de análise contribui para se organizar um plano de gestão dos recursos naturais em sistemas de produção agroflorestal complexos. Neste caso, tomaria como base de referência inicial a caracterização da situação presente do solo, a qual reflete as condições edafoclimáticas e de manejo em que se encontram. Esses dados podem orientar a definição de critérios para indicar os valores máximos desejáveis a serem alcançados para cada indicador de qualidade do solo. Para tanto, organizar a definição sobre quais tipos de manejo seriam mais adequados para serem implantados, monitorados e melhorados ao longo do tempo, visando obter produtividades de forma mais sustentável e o provimento de serviços ecossistêmicos dos sistemas agroflorestais tradicionais e agroecológicos de erva-mate em Floresta com Araucária.

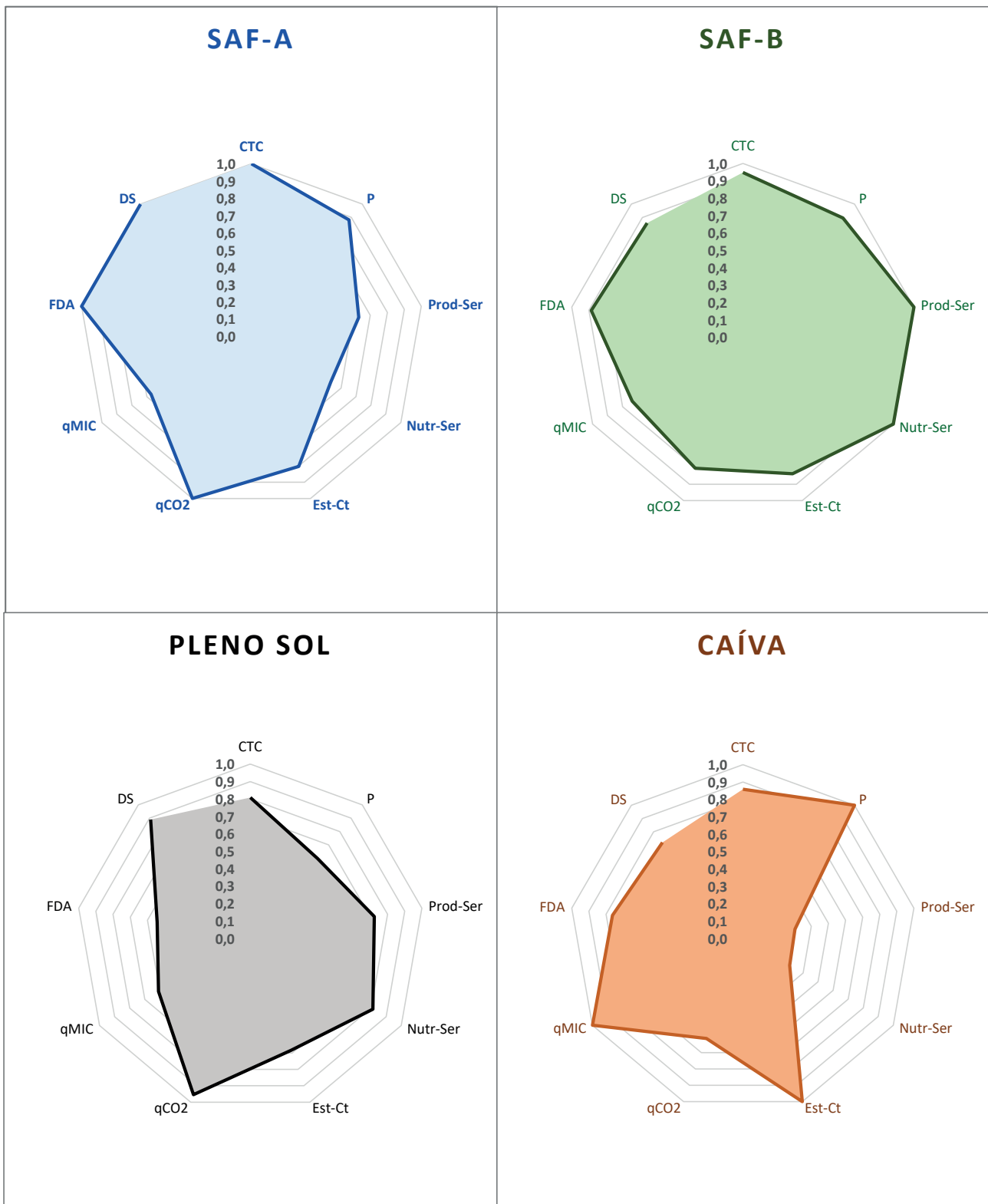


Figura 24. Diagrama de radar mostrando a avaliação da qualidade do solo, na camada de 0-10 cm, associados aos sistemas de produção com erva-mate na região de Bituruna, PR. Os eixos representam os valores relativos normalizados dos indicadores de qualidade do solo. Sistemas de produção: Pleno Sol; Caíva; SAF-A - Sistema Agroflorestal tipo A; SAF-B - Sistema Agroflorestal tipo B. Indicadores: Capacidade de troca de cátions (CTC), Fósforo disponível no solo (P), Produção acumulada de serapilheira (Prod-Ser), Estoque de Nutrientes na serapilheira (Nutr-Ser, N+Ca+Mg+K+P+S), Estoque de carbono total no solo (Est-Ct), Quociente metabólico (qCO₂), Quociente microbiano (qMIC), Atividade microbiana (FDA) e Densidade do solo (DS).

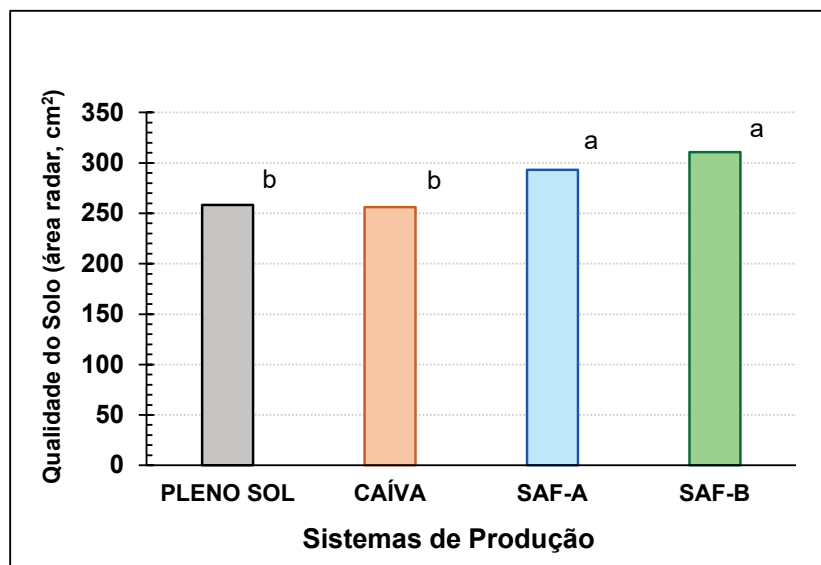


Figura 25. Qualidade do solo (área do diagrama radar, em cm²), na camada de 0-10 cm, associada aos sistemas de produção com erva-mate na região de Bituruna, PR. Sistemas de produção: Pleno Sol; Caíva; SAF-A - Sistema Agroflorestal tipo A; SAF-B - Sistema Agroflorestal tipo B. Letras: Diferença entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade).

Tabela 5. Quantidade relativa (área do diagrama radar, em cm²) de cada indicador de qualidade do solo existente nos sistemas de produção de erva-mate, na camada de 0-10 cm.

Sistemas de Produção*	CTC**	P	Prod-Ser	Nutr-Ser	Est-Ct	qCO ₂	qMIC	FDA	DS	Área Total (cm ²)
Quantidade Relativa (área radar em cm ²)										
PLENO SOL	27,4b***	25,8b	29,9ab	29,2b	31,9a	30,5a	22,5b	28,0c	33,1abc	258,3b
CAÍVA	36,2a	25,4b	12,0c	25,6b	31,5a	31,5a	34,4a	28,9c	30,8c	256,2b
SAF-A	36,7a	29,5ab	22,7b	26,0b	35,1a	32,6a	32,6a	39,0a	39,0a	293,2a
SAF-B	36,0a	37,0a	39,0a	35,8a	31,9a	30,0a	31,6a	34,0b	35,2b	310,6a

* Sistemas de produção: Pleno Sol; Caíva; SAF-A - Sistema Agroflorestal tipo A; SAF-B - Sistema Agroflorestal tipo B. ** Indicadores: Capacidade de troca de cátions (CTC), Fósforo disponível no solo (P), Produção acumulada de serapilheira (Prod-Ser), Estoque de Nutrientes na serapilheira (Nutr-Ser, N+Ca+Mg+K+P+S), Estoque de carbono total no solo (Est-Ct), Quociente metabólico (qCO₂), Quociente microbiano (qMIC), Atividade microbiana (FDA) e Densidade do solo (DS). *** Letras: Diferenças entre médias com teste t de Student (5% de probabilidade), entre sistemas de produção, em cada indicador.

Os principais requisitos de manejo sustentável do solo são: (i) manutenção da concentração de carbono orgânico do solo (SOC) em um nível acima do limiar crítico na zona radicular, (ii) otimização da qualidade física do solo incluindo estrutura e retenção de água, (iii) manejo de nutrientes das plantas, (iv) melhoria das propriedades biológicas do solo, (v) melhoria do crescimento e proliferação das raízes, e (vi) redução dos riscos de erosão do solo e outros processos de degradação (Dexter, 2004; Lal, 2013, 2015). A maioria desses requisitos são atendidos com o uso contínuo de sistemas agroflorestais, principalmente quando o conhecimento tradicional é aliado ao conhecimento científico, gerando o conhecimento aplicado. A produção em sistemas agroflorestais também está associada à manutenção da biodiversidade e utiliza a estratégia conhecida como compartilhamento de terras (*land sharing*), onde se pode produzir e conservar simultaneamente (Fischer et al., 2014). Nesse contexto, cultivos onde há associações de espécies estão menos sujeitos a episódios de destruição da produção por secas e são mais resistentes ao ataque de pragas e doenças, além de serem ambientalmente mais favoráveis à manutenção de polinizadores.

A produtividade nesses sistemas de manejo tradicional e com base ecológica poderia ser melhorada, por exemplo, com a utilização de algumas estratégias de adubação orgânica, adubação verde, biofertilizantes, inoculação de microrganismos eficientes (promotores de crescimento radicular, mineralizadores de nutrientes do solo, fixação biológica de nutrientes, micorrizas), entre outras, buscando ajustar a melhor época de manejo, de modo a repor ou disponibilizar parte dos nutrientes exportados pela colheita da erva-mate, ao se ponderar que a ciclagem de nutrientes por meio da serapilheira depende de vários fatores, e está relacionada com a quantidade e diversidade de árvores no SAF, entre outros fatores como o tipo de solo (minerais existentes etc.).

Certamente que vários fatores atuam num SAF de forma integrada e sinérgica, sendo que algumas estratégias poderiam ser aplicadas para que possam melhorar e dar sustentabilidade para esses sistemas de produção, sem que percam sua identidade cultural histórica de conviver de forma sustentável com a natureza. Por exemplo, estratégias de: manejo da erva-mate; diversidade de "variedades" ou "clones" mais eficientes em vários aspectos e desenvolvidos para SAF de base ecológica; manejo florestal conduzido para preservar diversidade de espécies associada com diversidade de produtos de forma sustentável; entre outras

Para tanto, deve-se considerar que esses agricultores possam ser compensados e motivados, por exemplo, mediante políticas públicas que possam subsidiar e viabilizar formas de compensação pelos serviços ambientais que esses sistemas de produção fornecem para a sociedade como um todo. Entre algumas políticas públicas, a de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (Lei 14.119, Brasil, 2021), associados ao manancial hídrico local e regional e à conservação do solo (proteção à erosão e melhoria da qualidade do solo) (Santos et al., 2020b), à biodiversidade, à mitigação do aquecimento global e mudanças climáticas (sequestro e estoque de carbono) (Sills et al., 2014; Matuk et al., 2020), à preservação cultural e potencial turístico pela paisagem (Brancaion et al., 2014) e aspectos correlacionados.

Resumo dos Resultados

- Os solos nos quatro sistemas de produção variam de argilosos a muito argilosos, apresentaram altos teores de carbono total, com elevada acidez (pH baixo e Al trocável alto, elevada acidez potencial do solo (H+Al) e de saturação por alumínio – m%), e baixa fertilidade (níveis muito baixos de P disponível, valores muito baixos de saturação por bases - Valor V e de soma de bases trocáveis - Valor S).
- Os perfis dos solos apresentaram valores de densidade do solo considerados não compactados para solos argilosos, sendo que SAF-A e SAF-B tiveram os valores menores, e Pleno Sol e Caíva os valores maiores. Especialmente na camada superficial do solo, o maior valor em Caíva indica efeito da presença do gado leiteiro durante o pastejo.
- Foi detectado efeito residual de calagem no sistema Pleno Sol, na camada superficial do solo, em relação aos valores encontrados de pH maior, menos Al trocável, maiores teores de Ca e Mg disponíveis, e maior Valor V.
- Os baixos valores de relação C/N dos solos nos sistemas de produção - SAF-B (10,6), Caíva (11,3), Pleno Sol (11,9) e SAF-A (12,4) – indicam que a matéria orgânica do solo nesses sistemas se encontra num estágio avançado de decomposição (humificado).

- Os estoques de carbono total (Est-C) nos perfis de solos (0-40 cm) foram semelhantes nos quatro sistemas de produção de erva-mate - Pleno Sol (118 Mg ha⁻¹), SAF-B (125 Mg ha⁻¹), SAF-A (139 Mg ha⁻¹), Caíva (144 Mg ha⁻¹). Entretanto, o Est-C na camada de 0-10 cm foi eficiente em detectar diferenças entre os sistemas na ordem: Pleno Sol (35,2 Mg ha⁻¹) < SAF-A (41,3 Mg ha⁻¹) ≤ SAF-B (43,0 Mg ha⁻¹) ≈ Caíva (51,4 Mg ha⁻¹).
- Os estoques de nitrogênio total (Est-N) nos perfis dos solos apresentaram as seguintes diferenças entre os sistemas de produção: Caíva (12,7 Mg ha⁻¹) ≈ SAF-B (11,8 Mg ha⁻¹) ≥ SAF-A (11,3 Mg ha⁻¹) ≥ Pleno Sol (9,9 Mg ha⁻¹).
- A quantidade de serapilheira acumulada - SAF-B (7,83 Mg ha⁻¹) > SAF-A (4,95 Mg ha⁻¹) ≈ Pleno Sol com (5,66 Mg ha⁻¹) > Caíva (2,39 Mg ha⁻¹) - pode estar diretamente relacionada com a quantidade de árvores que compõem o sistema agroflorestal com erva-mate.
- A menor relação C/N e o maior estoque de nitrogênio da serapilheira no SAF-B (22,6), e sua maior quantidade de resíduos orgânicos, indicam que sua decomposição ocorre sem problema (sem fator limitante) e com maior potencial de fornecimento gradativo de nutrientes para a erva-mate, em relação aos outros sistemas de produção. Esses dados contrastam com a serapilheira no sistema Caíva, que apresentou as menores quantidades de material orgânico acumulado e de N armazenado, e com maior relação C/N de 32,8. Por outro lado, as serapilheiras do SAF-A e Pleno Sol estariam numa condição intermediária em relação à quantidade de material orgânico acumulado cobrindo o solo, de N armazenado e da C/N com 25,5 (SAF-A), exceto a relação C/N de 22,7 do Pleno Sol que também foi baixa como no SAF-B.
- A quantidade total de nutrientes estocados na serapilheira indica o potencial de ciclagem de nutrientes nos sistemas de produção estudados, como sendo maior no SAF-B com 264,3 kg ha⁻¹ ≈ Pleno Sol com 214,7 kg ha⁻¹ > SAF-A com 140,4 kg ha⁻¹ > Caíva com 82,2 kg ha⁻¹, lembrando que, no Pleno Sol, houve aplicação de calcário e fertilizantes minerais.
- Os sistemas com erva-mate sombreada apresentaram, de modo geral, uma maior atividade microbiana. Isto provavelmente se deve ao aporte em matéria orgânica oriundo dos sistemas arbóreos em conjunto com a erva-mate. Três indicadores microbianos se mostraram sensíveis para detectar diferenças entre os sistemas de produção estudados, e foram utilizados para analisar a qualidade do solo.
- O acúmulo de material orgânico na superfície do solo caracterizado pela serapilheira e a dinâmica de sua decomposição promovida pelos organismos compõem um processo ecológico de ciclagem de nutrientes nos sistemas agroflorestais com erva-mate.
- O valor da área total do diagrama de radar, transformado em “quantidade relativa” (área radar em cm²), indicou que os SAF-A e SAF-B apresentaram melhores condições de qualidade do solo que os sistemas sob Pleno Sol e Caíva; respectivamente, com 14% e 21% a mais de quantidade relativa dos nove indicadores mais eficientes para expressão das funções do solo.

Conclusões

Os nove indicadores mais eficientes em caracterizar a qualidade do solo, na camada de 0-10 cm, nesse estudo foram: capacidade de troca de cátions (CTC), fósforo (P), produção de serapilheira, nutrientes na serapilheira, estoques de carbono no solo (Est-C), quociente metabólico (qCO₂), quociente microbiano (qMlc), atividade microbiana (FDA) e densidade do solo (DS).

A camada de 0-10 cm foi a mais eficiente para detectar diferenças entre os sistemas de produção quanto ao estoque de C total no solo, por ser a camada onde as ações dos organismos são mais intensas e integradas com os processos químicos e físicos do solo, junto à rede de sistemas radiculares das plantas. Considerando que a matéria orgânica do solo se relaciona com o provimento de vários serviços ecossistêmicos do solo, os agricultores devem buscar por boas práticas conservacionistas do solo e da água, de preparo, manejo florestal e da erva-mate, entre outras, visando a sustentabilidade desses sistemas.

Os diagramas de radar formados pelos nove indicadores e o valor de suas áreas permitiram avaliar a qualidade do solo em cada sistema de produção, indicando que os SAF-A e SAF-B apresentaram melhores condições de qualidade do solo que os sistemas sob Pleno Sol e Caíva.

A avaliação da qualidade do solo contribui para a organização de planos de manejo dos recursos naturais e de gestão do manejo florestal, visando melhorar a produtividade de forma mais sustentável, bem como aumentar o provimento de serviços ecossistêmicos dos sistemas agroflorestais tradicionais de erva-mate em Floresta com Araucária.

Agradecimentos

Aos agricultores Anísio Francisco da Rosa, Bernardo Vergopolen, Miguel Corrêa e Rosildo Stangherlin, pela disponibilidade das áreas amostradas e suporte aos trabalhos de campo desenvolvidos no período. Aos assistentes da Embrapa Florestas Jonatas Gueller, Mario Kioshi Yamada e Marcos Gonçalves Tenorio pelo auxílio nos trabalhos de campo nas áreas dos agricultores. À Marie Luise Carolina Bartz pela disponibilização das fotos ilustrando as espécies de minhocas encontradas nas áreas estudadas. À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa pelo financiamento do projeto “Uso e Conservação da araucária na agricultura familiar - Fase 2: o papel da erva-mate e dos sistemas tradicionais de manejo florestal na restauração e conservação da Floresta com Araucária” (Embrapa no. 16.16.05.002.00.03.001).

Referências

- ADAM, G.; DUNCAN, H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, p. 943-951, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3).
- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services: a global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101-111, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
- ALMAGRO, M.; RUIZ-NAVARRO, A.; DÍAZ-PEREIRA, E.; ALBALADEJO, J.; MARTÍNEZ-MENA, M. Plant residue chemical quality modulates the soil microbial response related to decomposition and soil organic carbon and nitrogen stabilization in a rainfed Mediterranean agroecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, e108198, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108198>.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1993. 265 p.
- ARAÚJO, Y.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, Y. D. Earthworm populations in a savanna agroforestry system of Venezuelan Amazonia. **Biology and Fertility of Soils**, v. 29, p. 413-418, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050573>.
- BARROS, E. Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazon. **Applied Soil Ecology**, v. 26, n. 2, p. 157-168, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.10.012>.

- BARTZ, M. L.; BROWN, G. G.; GONÇALVES, M.; LOCATELLI, M.; JAMES, S. W.; BARETTA, D. Minhocas *Urobenus* sp.: das matas para as áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 1, p. 6-7, 2011.
- BENEDETTI, E. L.; SANTIN, D.; BARROS, N. F. de; PEREIRA, G. L.; MARTINEZ, H. P.; LIMA NEVES, J. C. Alumínio estimula o crescimento radicular de erva-mate? **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 139-147, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.983>.
- BLAKEMORE, R. J. **Cosmopolitan earthworms**: an eco-taxonomic guide to the peregrine species of the world. Kippax: VermEcology, 2002.
- BLOUIN, M.; HODSON, M. E.; DELGADO, E. A.; BAKER, G.; BRUSSARD, L.; BUTT, K. R.; DAI, J.; DENDOOVEN, L.; PÉRÈS, G.; TONDOH, J. E.; CLUZEAU, D.; BRUN, J. J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. **European Journal of Soil Science**, v. 64, p. 101-182, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>.
- BORGES, R.; BOFF, M. I. C.; MANTOVANI, A.; RADOMSKI, M. I. Effect of cover on the development and production of secondary compounds of *Maytenus ilicifolia* and *Ilex paraguariensis* in agroforestry systems. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1630-1643, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832280>.
- BRAGA, L. P. P.; YOSHIURA, C.; BORGES, C. D.; HORN, M. A.; BROMN, G.; DRAKE, H. L.; TSAI, S. M. Disentangling the influence of earthworms in sugarcane rhizosphere. **Scientific Reports**, v. 6, e38923, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep38923>.
- BRANCALION, P. H. S.; CARDOZO, I. V.; CAMATTA, A.; ARONSON, J.; RODRIGUES, R. R. Cultural ecosystem services and popular perceptions of the benefits of an ecological restoration project in the Brazilian Atlantic Forest. **Restoration Ecology**, v. 22, n. 1, p. 65-71, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12025>.
- BRASIL. **Lei nº 14.119**, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14119.htm. Acesso em: 10 maio 2022. Publicada originalmente no Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, em 14 janeiro, 2021, retificado em 15 janeiro, 2021, promulgação de partes vetadas em 26 março, 2021 e 10 junho, 2021.
- BROWN, G. G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: princípios e práticas – o 3º Encontro Latino Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligoquetas (ELAETAO3). **Acta Zoológica Mexicana**, v. 26, n. 2, p. 1-18, 2010.
- BROWN, G. G.; GABRIAC, Q. Fauna edáfica e epiedáfica em florestas com araucária. In: SOUSA, V. A.; FRITZSONS, E.; PINTO JÚNIOR, J. E.; de AGUIAR, A. V. (org.). **Araucária**: Pesquisa e desenvolvimento no Brasil. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 121-148. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1137621>. Acesso em: 10 maio 2022.
- BROWN, G. G.; JAMES, S. W. Ecologia, biodiversidade e biogeografia das minhocas no Brasil. In: BROWN, G. G.; FRAGOSO, C. (Ed.). **Minhocas na América Latina**: Biodiversidade e ecologia. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2007. p. 297-381.
- BROWN, G. G.; PASHANASI, B.; GILOT, C.; PATRÓN, J. C.; SENAPATI, B. K.; GIRI, S.; BAROIS, I.; LAVELLE, P.; BLANCHART, E.; BLAKEMORE, R.; SPAIN, A.; BOYER, J. Effects of earthworms on plant production in the tropics. In: LAVELLE, P.; BRUSSAARD, L.; HEDRIX, P. F. (org.). **Earthworm management in tropical agroecosystems**. Wallingford, UK: CAB International, 1999. p. 87-147.
- CALDEIRA, M. V. W.; GODINHO, T. de O.; MOREIRA, F. L.; CAMPANHARO, I. F.; CASTRO, K. C.; MENDONÇA, A. R. de; TRAZZI, P. A. Litter as an ecological indicator of forest restoration processes in a Dense Ombrophylous Lowland Forest. **Floresta e Ambiente**, v. 26, nSpec. 1, e20180411, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.041118>.
- CALDEIRA, M. V. W.; MARQUES, R.; SOARES, R. V.; BALBINOT, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes – Floresta Ombrófila Mista Montana – Paraná. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 5, n. 2, p. 101-116, 2007. DOI: <https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v5i2.9720>.
- CALDEIRA, M. V. W.; VITORINO, M. D.; SCHAADT, S. S.; MORAES, E.; BALBINOT, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. Londrina, PR: **Semina**: Ciências Agrárias, v. 29, n. 1, p. 53-68, 2008.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, v. 1, 2003. 1039 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras). Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/publicacoes/especies-arboreas-brasileiras>. Acesso em: 10 maio 2022.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras**: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Colombo: Embrapa - CNPF; Brasília: Embrapa-SPI, 1994. 639 p. Disponível em: https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/temp/index_especies.htm. Acesso em: 10 maio 2022.

CHAIMSOHN, F. P.; RADOMSKI, M. I. Sistemas tradicionais de erva-mate: características biofísicas, socioeconômicas e ambientais. In: **SEMINÁRIO ERVA-MATE**, 21., 2016, Curitiba. Anais [...]. Colombo: Embrapa Florestas, 2016. p. 30-33. (Embrapa Florestas. Documentos, 298). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/155123/1/Paginas-30-33-de-Doc-298-1414-Completo.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

CHAIMSOHN, F. P.; SOUZA, A. M. (ed.). **Sistemas de produção tradicionais e agroflorestais de erva-mate no centro-sul do Paraná e norte catarinense**: contribuições para a construção do processo de Indicação Geográfica. Ponta Grossa: IAPAR; EPAGRI, 2012. 118 p. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832280>.

DAY, S.; MONTAGNINI, F.; EIBL, B. Effects of native trees in agroforestry systems on the soils and yerba mate in Misiones, Argentina. In: MONTAGNINI, F.; FRANCESCONI, W.; ROSSI, E. (ed.). **Agroforestry as a Tool Landscape Restor**. New York, USA: Nova Science Publisher, 2011. p. 99-112.

DE GROOT, R. S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, v. 7, p. 260-272, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.

EIBL, B. I.; MONTAGNINI, F.; LÓPEZ, M. A.; LÓPEZ, L. N.; MONTECHIESI, R.; ESTERCHE, E. Organic yerba mate, *Ilex paraguariensis*, in association with native species: a sustainable production alternative. In: MONTAGNINI, F. (ed.). **Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty**. Advances in Agroforestry. New Haven, USA: Springer, 2017. p. 261-281. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69371-2_11.

FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol**. Rome, 2020. 133 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.

FAO. **Soil organic carbon**: the hidden potential. Rome, 2017, 77 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6937en/i6937EN.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

FEIJOO, M. A.; BROWN, G. G.; JAMES, S. W. New species of *Andiorrhinus Cognetti*, 1908 (Oligochaeta: Rhinodrilidae) from Venezuela and Brazil. **Zootaxa**, v. 4363, p. 55-78, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4363.1.2>.

FEIJOO, M. A.; BROWN, G. G. New species of Glossoscolex and Fimoscolex earthworms (Oligochaeta: Glossoscolecidae) from Embrapa Forestry, Paraná, Brazil. **Zootaxa**, v. 4496, p. 492-502, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4496.1.38>.

FELLER, C.; BLANCHART, E.; BERNOUX, M.; LAL, R.; MANLAY, R. Soil fertility concepts over the past two centuries: the importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 58, p. S3-S21, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.693598>.

FELLER, C.; MANLAY, R. J.; SWIFT, M. J.; BERNOUX, M. Functions, services and value of soil organic matter for human societies and the environment: a historical perspective. In: FROSSARD, E.; BLUM, W. E. H.; WARKENTIN, B. P. (ed.). **Function of soils for human societies and the environment**. London, UK: Geological Society, 2006. p. 9-22. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-02/010041688.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. (ed.). **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019a. 121 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1110948/marco-referencial-em-servicos-ecossistemicos>. Acesso em: 10 maio 2022.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; SIMÕES, M. G.; CAMPANHA, M. M.; FIDALGO, E. C. C.; LIMA, I. B. T. de; TURETTA, A. P. D.; TONUCCI, R. G.; MONTEIRO, J. M. G.; PARRON, L. M. Serviços ecossistêmicos: uma abordagem conceitual. In: FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. (ed.). **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, p. 19-34, 2019b. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1110949>. Acesso em: 10 maio 2022.

FIGUEIREDO FILHO, A.; SERPE, E. L.; BECKER, M.; SANTOS, D. F. dos. Produção estacional de serapilheira em uma Floresta Ombrófila Mista na Floresta Nacional de Itati (PR). **Ambiência**, v. 1, n. 2, p. 257-269, 2005. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/219>. Acesso em: 17 maio 2022.

FISCHER, J.; ABSON, D. J.; BUTSIC, V.; CHAPPELL, M. J.; EKROOS, J.; HANSPACH, J.; KUEMMERLE, T.; SMITH, H. G.; WEHRDEN, H. von. Land sparing versus land sharing: moving forward. **Conservation Letters**, v. 7, n. 3, p. 149-157, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12084>.

GAREAU, T. P.; SMITH, R. G.; BARBERCHECK, M. E.; MORTENSEN, D. A. Spider plots: a tool for participatory extension learning. **The Journal of Extension**, v. 48, n. 5, artigo 30, 2010. Disponível em: <https://tigerprints.clemson.edu/joe/vol48/iss5/30>. Acesso em: 18 agosto 2022.

- GERASIMOVA, M.; REINSCH, T.; SMITH, P. The role of soils in ecosystem processes. In: FAO. ITPS. Intergovernmental Technical Panel on Soils. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report**. Rome, 2015. p. 13-30. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/7a979d68-7a6d-425a-8a0f-a7046a356d77>; <https://www.fao.org/3/bc591e/bc591e.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- HANISCH, A. L.; NEGRELLE, R. R. B.; BONATTO, R. A.; NIMMO, E. R.; LACERDA, A. E. B. Evaluating Sustainability in Traditional Silvopastoral Systems (caívas): Looking Beyond the Impact of Animals on Biodiversity. **Sustainability**, v. 11, n. 11, p. 3098-3113, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11113098>.
- HANISCH, A. L.; NEGRELLE, R. R. B.; MONTEIRO, A. L.; LACERDA, A. E. B.; PINOTTI, L. C.A. Combining silvopastoral systems with forest conservation: the caíva system in the Araucária Forest, Southern Brazil. **Agroforest Systems**, v. 96, p. 759-771, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00738-7>.
- HANISCH, A. L.; RADOMSKI, M. I.; BONA, L. C.; MARQUES, A. da C. Melhoria da produção animal em áreas de caíva e sua contribuição para a viabilização de corredores ecológicos. **Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 6, n. 2, p. 170-188, 2016. DOI: <https://doi.org/10.24302/drd.v6i2.1152>.
- HASSAN, R.; SCHOLLES, R.; ASH, N. (ed.). **Ecosystems and human well-being: current state and trends**. Washington, DC: Island Press, 2005. 948 p. v. 1. (The Millennium Ecosystem Assessment series, v. 1). Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/en/Condition.html>. Acesso em: 10 maio 2022.
- HECK, C. I.; DE MEJIA, E. G. Yerba Mate Tea (*Ilex paraguariensis*): A Comprehensive Review on Chemistry, Health Implications, and Technological Considerations. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 9, p. R138-R151, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00535.x>.
- ISHIZUKA, K. A review of the Genus *Pheretima* s. Lat. (Megascolecidae) from Japan. **Edaphologia**, n. 62, p. 55-80, 1999.
- JAMES, S. W.; BARTZ, M. L. C.; STANTON, D. W. G.; CONRADO, A. C.; DUPONT, L.; TAHERI, S.; SILVA, E. da; CUNHA, L.; BROWN, G. G. A neotype for *Pontoscolex corethrurus* (Müller, 1857) (Clitellata). **Zootaxa (Online)**, v. 4545, p. 124, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4545.1.7>.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effect of biocidal treatment on metabolism in soil: a method of measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, p. 209-213, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5).
- KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, v. 6, p. 68-72, 1988.
- KUYAH, S.; ÖBORN, I.; JONSSON, M. Regulating ecosystem services delivered in agroforestry systems. In: DAGAR, J. C.; TEWARI, V.P. (ed.). Singapore: Springer, p. 797-815, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7650-3_33.
- LACERDA, A. E. B.; HANISCH, A. L.; NIMMO, E. R. Leveraging traditional agroforestry practices to support sustainable and agrobiodiverse landscapes in Southern Brazil. **Land**, v. 9, n. 6, p. 176-194, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9060176>.
- LACERDA, A. E. B. **Série erva-mate sombreada (1)**: sistema de produção de erva-mate baseado no manejo tradicional - bracingais dominados por bambus (taquarais). Colombo: Embrapa Florestas, 2019a. 24 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 439). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/2054671/1/CT-439-1682-final-1.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.
- LACERDA, A. E. B. **Série erva-mate sombreada (2)**: sistema de restauração produtivo agroflorestal. Colombo: Embrapa Florestas, 2019b. 13 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 440). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205685/1/CT-440-1677-final.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.
- LAL, R. Enhancing ecosystem services with no-till. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 28, n. 2, p. 102-114, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1742170512000452>.
- LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, n. 1-3, p. 242-258, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>.
- LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7055875>.
- LAPIED, E.; LAVELLE, P. The peregrine earthworm *Pontoscolex corethrurus* in the East coast of Costa Rica. **Pedobiologia**, v. 47, n. 5-6, p. 471-474, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00215>.
- LIMA, A. C. R. de; RODRÍGUEZ, C. Earthworm diversity from Rio Grande do Sul, Brazil, with a new native Criodrilid genus and species (Oligochaeta: Criodrilidae). **Megadrilogica**, v. 11, n. 2, p. 9-18, 2007.

LONGHI, R. V.; LONGHI, S. J.; CHAMI, L. B.; WATZLAWICK, L. F.; EBLING, A. A. Produção de serapilheira e retorno de macronutrientes em três grupos florísticos de uma floresta ombrófila mista, RS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 699-710, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050984514>.

LOPES, A. A. de C.; SOUSA, D. M. G. de; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. de C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 461-472, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>.

MACHADO, N. C.; DA FONSECA, A. F.; CHAIMSOHN, F. P.; RIFERTE, F. B. Litterfall production, nutrient input and soil fertility in yerba-mate agroforestry systems. **African Journal of Plant Science**, v. 15, n. 4, p. 100-114, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJPS2020.2068>.

MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SANTOS, F. S. dos. **Métodos de preparo de amostras e de determinação de Carbono em solos tropicais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 9 p. (Embrapa Solos. Circular técnica, 19). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS/11582/1/circotec_19_2003_metodos_preparo.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

MANUAL de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: SBCS-NRS, 2016. 376 p. Disponível em: http://www.sbcns-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

MARICHAL, R.; FEIJOO, M. A.; PRAXEDES, C.; RUIZ, D.; CARJAVAL, A. F.; OSZWALD, J.; del PILAR HURTADO, M.; BROWN, G. G.; GRIMALDI, M.; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; DECAENS, T.; VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Invasion of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta) in landscapes of the Amazonian deforestation arc. **Applied Soil Ecology**, v. 46, p. 443-449, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.09.001>.

MARQUES, A. C.; REIS, M. S.; DENARDIN, V. F. As paisagens da erva-mate: uso das florestas e conservação socioambiental. **Ambiente & Sociedade**, v. 22, p. 1-22, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc201702822vu2019L3AO>.

MARQUES, A. da C. **As paisagens do mate e a conservação socioambiental: um estudo junto aos agricultores familiares do planalto norte catarinense**. 2014. 434 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/35824>. Acesso em: 10 maio 2022.

MATUK, F. A.; TURNHOUT, E.; FLESKENS, L.; AMARAL, E. F. do; HAVERROTH, M.; BEHAGEL, J. H. Allying knowledge integration and co-production for knowledge legitimacy and usability: The Amazonian SISA policy and the Kaxinawá Indigenous people case. **Environmental Science and Policy**, v. 112, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.018>.

MEA - Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC.: Island Press, 2005. 137 p. (The Millennium Ecosystem Assessment series). Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.html>. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

MONTAGNINI, F.; EIBL, B. I.; BARTH, S. R. Organic yerba mate: an environmentally, socially and financially suitable agroforestry system. **Bois et forêts des tropiques**, v. 2, n. 308, p. 59-72, 2011. DOI: <https://doi.org/10.19182/bft2011.308.a20475>.

MONTAGNINI, F. The Contribution of Agroforestry to Restoration and Conservation: Biodiversity Islands in Degraded Landscapes. In: DAGAR, J. C.; GUPTA, S. R.; TEKETAY, D. (ed.). **Agroforestry for Degraded Landscapes**. Singapore: Springer, 2020. p. 445-479. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4136-0_15.

MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; MAGRI, E.; PEDREIRA, G. Q.; SANTIN, D.; PRIOR, S. A.; CONSALTER, R.; YOUNG, S. D.; BROADLEY, M. R.; BENEDETTI, E. L. Elemental composition of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) under low input systems of southern Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 736, e139637, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139637>.

NAIR, P. K. R.; TONUCCI, R. G.; GARCIA, R.; NAIR, V. D. Silvopasture and carbon sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (ed.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges**. Dordrecht: Springer, 2011. p. 145-162. (Advances in Agroforestry book series, v. 8) DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_8.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (ed.). **Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties**. Part 2. 2nd ed. Madison: ASA; SSSA, 1982. p. 539-579.

NICHOLLS, C. I.; ALTIERI, M. A.; DEZANET, A.; LANA, M.; FEISTAUER, D.; OURIQUES, M. A rapid, farmer-friendly agroecological method to estimate soil quality and crop health in vineyard systems. **Biodynamics**, v. Autumn, p. 33-40, 2004. Disponível em: https://agroecology.berkeley.edu/resources/Nicholls_2004_Rapid_farmer_friendly_agroecological_method.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

- NICHOLLS, C. I.; ALTIERI, M. A.; KOBAYASHI, M.; TAMURA, N.; MCGREEVY, S.; HITAKA, K. Assessing the agroecological status of a farm: a principle-based assessment tool for farmers. **Agro Sur**, v. 48, n. 2, p. 29-41, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4206/agrosur.2020.v48n2-04>.
- NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2019. 216 p. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/atlas-climatico/atlas-climatico-do-parana-2019.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.
- NOGUEIRA, A. R. de A.; SOUZA, G. B. de. **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 334 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/44394>. Acesso em: 10 maio 2022.
- PEREIRA P.; BOGUNOVIC I.; MUNOZ-ROJAS M.; BREVIK E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 5, p. 7-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>.
- PINHO, R. C.; MILLER, R. P.; ALFAIA, S. S. Agroforestry and the Improvement of Soil Fertility: A View from Amazonia. **Applied and Environmental Soil Science**, p. 11, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/616383>.
- PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; MONTEIRO, J. M. G.; SCHULER, A. E.; VEZZANI, F. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, A. P. de; VIANA, J. H. M.; PEDREIRA, B. da C. C. G.; MENDES, I. de C.; REATTO, R.; PARRON, L. M.; CLEMENTE, E. de P.; DONAGEMMA, G. K.; TURETTA, A. P. D.; SIMÕES, M. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1021-1038, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900002>.
- RADOMSKI, M. I.; LACERDA, A. E. B.; KELLERMANN, B. **Sistemas agroflorestais: restauração ambiental e produção no âmbito da Floresta Ombrófila Mista**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 47 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>. Acesso em: 10 maio 2022.
- RAMIREZ, M. R.; MOHAMAD, L.; ALARCON-SEGOVIA, L. C.; RINTOUL, I. Effect of processing on the nutritional quality of *Ilex paraguariensis*. **Applied Sciences**, v. 12, n. 5, p. 2487-2500, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052487>.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274250019_Qualidade_dos_solos_e_sustentabilidade_de_sistemas_agricolas. Acesso em: 17 maio 2022.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria: Departamento de Solos, UFSM, 2006. 18 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337498761_Reinert_Reichert_-_Propriedades_fisicas_do_solo. Acesso em: 17 maio 2022.
- REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C. **Biomassa Microbiana do Solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 38 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/572256/1/doc205.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.
- REISSMANN, C. B.; CARNEIRO, C. Crescimento e composição química de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), transcorridos oito anos de calagem. **Revista Floresta**, v. 34, n. 3, p. 381-386, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rev.v34i3.2424>.
- REISSMANN, C. B.; PREVEDELLO, B. M. S. Influência da calagem no crescimento e na composição química foliar da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Instituto Florestal**, v. 4-2, nesp. p. 625-629, 1992. Anais - 2º Congresso Nacional sobre Essências Nativas - 29/3/1992-3/4/1992. RIF4-2. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/iflorestal/iframe/RIF4-2/RIF4-2_625-629.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.
- REISSMANN, C. B.; RADOMSKI, M. I.; QUADROS, R. M. B. de. Chemical composition of *Ilex paraguariensis* St. Hil. under different management conditions in seven localities of Paraná State. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, p. 187-194, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/JdTRXZTYXhwzNcxFhQVRcpF/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 10 maio 2022.
- RIGHI, G. **Minhocas de Mato Grosso e de Rondônia**. Brasília: SCT/PR-CNPq, 1990. 157 p. Programa do Trópico Úmido, Programa Polonoeste, Relatório de Pesquisa nº 12.
- RIGHI, G. On a collection of Neotropical Megadrili Oligochaeta. I. Ocnodrilidae, Acanthodrilidae, Octochaetidae, Megascolecidae. **Studies on Neotropical Fauna and Environment**, v. 19, n. 1, p. 9-31, 1984.
- RODRIGUEZ, L.; SUÁREZ, J. C.; PULLEMAN, M.; GUACA, L.; RICO, A.; ROMERO, M.; QUINTERO, M.; LAVELLE, P. Agroforestry systems in the Colombian Amazon improve the provision of soil ecosystem services. **Applied Soil Ecology**, v. 164, p. e-103933, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103933>.
- SAMOGGIA, A.; LANDUZZI, P.; VICIÉN, C. E. Market expansion of caffeine-containing products: Italian and Argentinian yerba mate consumer behavior and health perception. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, p. 8117-8143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18158117>.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; KASEKER, J. F.; BASTOS, M. C.; REISSMANN, C. B.; WENDLING, I.; BARROS, N. F. de. Nutrição e crescimento da erva-mate submetida à calagem. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 55-66, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050988439>.

SANTOS, F. A. M. dos; COELHO-JUNIOR, M. G.; CARDOSO, J. C.; BASSO, V. M.; MARQUES, A. L. de P.; SILVA, E. M. R. da. Program outcomes of payments for watershed services in Brazilian Atlantic forest: how to evaluate to improve decision-making and the socio-environmental benefits. **Water**, v. 12, n. 9, e2441, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12092441>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; dos ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 531 p.

SANTOS, J. P.; SOBRAL-SOUZA, T.; BROWN, K. S.; VANCINE, M. H.; RIBEIRO, M. C.; FREITAS, A. V. L. Effects of landscape modification on species richness patterns of fruit-feeding butterflies in Brazilian Atlantic Forest. **Diversity and Distributions**, v. 26, p. 196-208, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.13007>.

SANTOS, S. C. L. dos. **Avaliação comparativa entre sistema agroflorestal com erva-mate e fragmento de floresta ombrófila mista quanto à fitossociologia, parâmetros químicos e físicos do solo e ciclagem de nutrientes**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: http://www.pgcsolo.agrarias.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2013/04/2009_07_31_santos.pdf. Acesso em: 17 maio 2022.

SAUTTER, K. D. Present knowledge on earthworm biodiversity in the State of Paraná, Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, p. 296-300, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.038>.

SCHARLEMANN, J. P. W.; TANNER, E. V. J.; HIEDERER, R.; KAPOV, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v. 5, p. 81-91, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.

SCHIPANSKI, M. E.; BARBERCHECK, M.; DOUGLAS, M. R.; FINNEY, D. M.; HAIDER, K.; KAYE, J. P.; KEMANIAN, A. R.; MORTENSEN, D. A.; RYAN, M. R.; TOOKER, J.; WHITE, C. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. **Agricultural Systems**, v. 125, p. 12-22, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.11.004>.

SCHNÜRER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 43, p. 1256-1261, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1256-1261.1982>.

SILLS, E. O.; ATMADJA, S. S.; de SASSI, C.; DUCHELLE, A. E.; KWEKA, D. L.; RESOSUDARMO, I. A. P.; SUNDERLIN, W.D. (ed.). **REDD+ on the ground: a case book of subnational initiatives across the globe**. Bogor, Indonesia: CIFOR, 2014. 505 p. DOI: <https://doi.org/10.17528/cifor/005202>.

SILVA, F. C. da. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.

SMITH, R. G.; GAREAU, T. P.; MORTENSEN, D. A.; CURRAN, W. S.; BARBERCHECK, M. E. Assessing and visualizing agricultural management practices: a multivariable hands-on approach for education and extension. **Weed Technology**, v. 25, n. 4, p. 680-687, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1614/WT-D-10-00156.1>.

SIMON, C. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210103, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc2021010>.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C labeled cells. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, p. 337-343, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90014-4).

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGEL, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (ed.). **Methods of soil analysis: part 2. Microbiological and biochemical properties**. Madison: SSSA, 1994. p. 775-833.

TAHERI, S.; PELOSI, C.; DUPONTO, L. Harmful or useful? A case study of the exotic peregrine earthworm morphospecies *Pontoscolex corethrurus*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 116, p. 277-289, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.030>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acesso em: 10 maio 2022.

TIESSEN, H.; CUEVAS, E.; CHACON, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. **Nature**, v. 371, p. 783-785, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1038/371783a0>.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Measurements for estimation of carbon stocks in afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism: A field manual**. Bonn, 2015. 72 p. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/publications/cdm_afforestation_field-manual_web.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, p. 703-707, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

VERCHOT, L. V.; VAN NOORDWIJK, M.; KANDJI, S.; TOMICH, T.; ONG, C., ALBRECHT, A.; MACKENSEN, J.; BANTILAN, C.; ANUPAMA, K. V.; PALM, C. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, p. 901-918, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9105-6>.

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: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>.

XAVIER, F. A. da S.; MENDONÇA, E. de S. Agroforestry for recovering soil organic matter: a Brazilian perspective. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, n. 1, p. 45-52, 2011. Disponível em: [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2011/DSDP_5\(S11\)/DSDP_5\(S11\)45-52o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2011/DSDP_5(S11)/DSDP_5(S11)45-52o.pdf). Acesso em: 10 maio 2022.

Embrapa

Florestas

