

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**USO DA *SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK*
(SMAF) PARA AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO EM
AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA AMAZÔNIA**

Gabriel dos Santos Rocha

Biólogo

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**USO DA *SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK*
(SMAF) PARA AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO EM
AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA AMAZÔNIA**

Gabriel dos Santos Rocha

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Bordonal

Coorientador: Dr. Diego Alexander Aguilera Esteban

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Campus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Ciência do solo)

R672u Rocha, Gabriel dos Santos

Uso da SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK (SMAF) para avaliação da saúde do solo em agroecossistemas no bioma Amazônia / Gabriel dos Santos Rocha. -- Jaboticabal, 2026

58 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Ricardo de Oliveira Bordonal

Coorientador: Diego Alexander Aguilera Esteban

1. Sistemas agrícolas. 2. Solos Conservação. 3. Solos Manejo. 4. Recursos agrícolas Conservação. 5. Agricultura. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa pode apoiar o uso de sistemas agrícolas mais sustentáveis no bioma Amazônia ao identificar manejos que mantêm a saúde do solo, especialmente em seus atributos biológicos. Seus resultados podem contribuir para a conservação do solo, da produtividade agrícola e dos recursos naturais, em alinhamento com os ODS 2, 12, 13 e 15.

Potential impact of this research

This research may support the adoption of more sustainable agricultural systems in the Amazon biome by identifying management practices that help maintain soil health, especially its biological attributes. Its findings may contribute to soil conservation, agricultural sustainability, and the advancement of SDGs 2, 12, 13, and 15.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DA SOIL *MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK* (SMAF) PARA AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA AMAZÔNIA

AUTOR: GABRIEL DOS SANTOS ROCHA

ORIENTADOR: RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL

COORIENTADOR: DIEGO ALEXANDER AGUILERA ESTEBAN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL**
Data: 01/04/2026 17:18:47-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Pesquisador Dr. RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL (Participação Virtual)
Laboratório Nacional de Biorrenováveis / Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais -
Campinas/SP

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO**
Data: 31/03/2026 10:40:35-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO (Participação Virtual)
Departamento de Desenvolvimento Rural / Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) -
Araras/SP

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA**
Data: 01/04/2026 12:16:39-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Jaboticabal, 27 de março de 2026.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

GABRIEL DOS SANTOS ROCHA, filho de Maria Isabel dos Santos e Marcelo Gonçalves da Rocha, nasceu em 4 de dezembro de 1998, em Ituverava, estado de São Paulo, Brasil. Em 2018, ingressou no curso de licenciatura em Ciências Biológicas na Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), em Uberaba estado de Minas Gerais, com conclusão em 2023. Durante o curso participou de alguns projetos e grupos, como o “Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência” (PIBID) ao qual foi bolsista pela Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) durante os anos de 2018 - 2019. Em 2020 entrou para o “Programa Residência Pedagógica” ao qual também foi bolsista CAPES durante os anos de 2020 a 2022. Em 2022 entrou para o Centro Acadêmico Chico Mendes – Ciências Biológicas UFTM atuando como presidente, para os Engenheiros Sem Fronteiras (ESF) e a empresa júnior de biologia “BioPlanej” como assessor de comunicação. Também no mesmo ano trabalhou como Professor de Educação Básica (PEB) contratado pela Secretária de Estado de Educação de Minas Gerais para ministrar a disciplina de “Práticas experimentais” na Escola Estadual Paulo José Derenusson em Uberaba, Minas Gerais até o ano de 2023. Em 2023, ingressou no curso de mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), como bolsista CAPES, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), Campus de Jaboticabal – SP.

(...)

Eu acho que todo mundo tem

Uma sina, uma cruz pra carregar

E eu conheço a sua dor, eu andei por esses lados

(...)

Tem um milhão de coisas que eu não sei

Terno Rei

DEDICO

Dedico este trabalho a mim mesmo, por ter enfrentado essa jornada ao qual pouco sabia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir ter essa oportunidade, abençoar e iluminar o meu caminho.

À minha mãe, por sempre ter acreditado em mim, incentivado a não desistir e sempre ter orgulho de mim.

À minha terapeuta Maria de Fátima, que me acompanhou desde o início dessa jornada e sempre me ajudou a enfrentar essa “montanha-russa”.

Ao meu orientador Dr. Ricardo de Oliveira Bordonal, por ter aceitado me orientar e pela paciência durante todo o processo, em que tudo era novo para mim.

Ao meu coorientador Dr. Diego Alexander Aguilera Esteban, que entrou para somar, sempre me ajudando no que precisei e disposto a me ensinar o que eu ainda não sabia.

Ao professor Dr. Alan Rodrigo Panosso, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela ajuda, pelos conselhos, pela amizade e pela orientação.

Ao Departamento de Ciências Exatas por ter me recebido e acolhido tão bem, em especial a “Sala Indefinida” onde conheci pessoas maravilhosas. Agradeço pelos nossos momentos de “cafezinhos” (e às vezes com bolos), pelas conversas e desabafos. Vocês tornaram os meus dias mais leves e felizes!

À minha amiga e ex-vizinha Ingrid, que conheci quando me mudei para a cidade, e que sempre esteve ao meu lado durante todo esse processo, me ajudando e me motivando a não desistir.

Aos amigos que fiz em Jaboticabal — é difícil mudar para uma cidade onde não se conhece ninguém. Obrigado pela amizade e por estarem sempre presentes.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Saúde do solo.....	5
2.2 Manejo do solo	8
2.3 <i>Soil Management Assessment Framework (SMAF)</i>	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1. Descrição da área de estudo	13
3.2. Amostragem e análises do solo	15
3.3. Avaliação da saúde do solo	16
3.4. Análise estatísticas.....	18
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Indicadores de saúde do solo e scores SMAF.....	19
4.2. Componentes e índice de saúde do solo.....	21
5. DISCUSSÃO.....	23
5.1. Efeitos dos sistemas agrícolas nos indicadores de saúde do solo.....	23
___ <i>Indicadores químicos do solo</i>	23
___ <i>Indicadores biológicos do solo</i>	25
___ <i>Indicador físico do solo</i>	27
5.2. Índice geral de saúde do solo na camada 0–30 cm.....	28
5.3. Implicações metodológicas para o manejo do solo.....	29
6. CONCLUSÕES	29
REFERENCIAS	30
APÊNDICE	41

USO DA SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK (SMAF) PARA AVALIAÇÃO DA SAÚDE DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA AMAZÔNIA

RESUMO - A saúde do solo é fundamental para a sustentabilidade dos agroecossistemas, especialmente na região amazônica, onde a conversão da vegetação nativa para usos agrícolas intensivos tem causado degradação e comprometimento dos serviços ecossistêmicos. Objetivou-se, com este estudo avaliar a saúde do solo em três sistemas agrícolas no sul da Amazônia brasileira: sucessão de culturas, integração lavoura-pecuária e pastagem manejada. Foram analisados sete indicadores de saúde do solo, sendo esses divididos em químicos (pH, P e K), biológicos (carbono orgânico do solo, carbono da biomassa microbiana e β -glicosidase) e físico (densidade do solo), e avaliados em quatro profundidades (0–5, 5–10, 10–20 e 20–30 cm). Os resultados foram interpretados por meio da ferramenta *Soil Management Assessment Framework* (SMAF), que atribuiu scores individuais para cada indicador e um índice integrado de saúde do solo (ISS) para a camada de 0-30 cm. Os resultados mostraram que a pastagem e a integração lavoura-pecuária melhoram a saúde do solo e que os indicadores biológicos foram mais sensíveis às mudanças de uso e manejo do solo em relação aos indicadores químicos e físicos. Nas camadas de 0-5 e 0-30 cm, a pastagem manejada e a integração lavoura-pecuária melhoraram a qualidade biológica do solo com maiores médias de score biológico (0,70 para ambos) comparado com a sucessão de culturas (0,67), enquanto nas camadas de 10-20 e 20-30 cm a qualidade biológica do solo foi melhorada pela pastagem (0,62 e 0,57) em relação à sucessão de culturas (0,42 e 0,40). O ISS geral evidenciou a melhoria da saúde do solo ($p < 0,05$) promovida pelos sistemas de pastagem (0,60 e 0,62) e integração lavoura-pecuária (0,58 em ambas as camadas) nas camadas de 10-20 e 20-30 cm em comparação a sucessão de culturas (0,50 em ambas as camadas). Portanto, os resultados demonstram que os sistemas de pastagem manejada e integração lavoura-pecuária são estratégias efetivas para promover melhor saúde do solo, especialmente nos atributos biológicos e nas camadas subsuperficiais, em agroecossistemas na Amazônia brasileira.

Palavras-chave: Qualidade do solo; Sistema de manejo do solo; Integração lavoura-pecuária; Pastagem manejada; Sustentabilidade agrícola.

USE OF THE SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK (SMAF) TO ASSESS SOIL HEALTH IN AGROECOSYSTEMS IN THE AMAZON BIOME

ABSTRACT - Soil health is fundamental to the sustainability of agroecosystems, especially in the Amazon region, where the conversion of native vegetation to intensive agricultural uses has caused degradation and impairment of ecosystem services. This study aimed to evaluate soil health in three agricultural systems in the southern Brazilian Amazon: crop rotation, crop-livestock integration, and managed pasture. Seven soil health indicators were analyzed, divided into chemical (pH, P, and K), biological (soil organic carbon, microbial biomass carbon, and β -glucosidase), and physical (soil density), and evaluated at four depths (0–5, 5–10, 10–20, and 20–30 cm). The results were interpreted using the Soil Management Assessment Framework (SMAF), which assigned individual scores to each indicator and an integrated soil health index (ISS) for the 0–30 cm layer. The results showed that pasture and crop-livestock integration improve soil health and that biological indicators were more sensitive to changes in land use and management compared to chemical and physical indicators. In the 0–5 and 0–30 cm layers, managed pasture and crop-livestock integration improved soil biological quality with higher average biological scores (0.70 for both) compared to crop rotation (0.67), while in the 10–20 and 20–30 cm layers, soil biological quality was improved by pasture (0.62 and 0.57) compared to crop rotation (0.42 and 0.40). The overall ISS showed improved soil health ($p < 0.05$) promoted by pasture systems (0.60 and 0.62) and crop-livestock integration (0.58 in both layers) in the 10–20 and 20–30 cm layers compared to crop rotation (0.50 in both layers). Therefore, the results demonstrate that managed pasture systems and crop-livestock integration are effective strategies to promote better soil health, especially in biological attributes and subsurface layers, in agroecosystems in the Brazilian Amazon.

Keywords: Soil quality, Soil management system, Crop-livestock integration, Managed pasture, Agricultural sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios dos indicadores de saúde do solo e scores SMAF (<i>Soil Management Assessment Framework</i>) para sistemas agrícolas no bioma Amazônia.	19
Tabela 1A: Análises químicas do solo inicialmente.	42
Tabela 2A: Taxas de calcário e fertilizante por elemento químico aplicados no experimento de campo ao longo de onze anos.	43
Tabela 3A: Algoritmos e demonstrações lógicas utilizadas para interpretação dos indicadores.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura e etapas na geração do índice de qualidade do solo pelo SMAF. Fonte: Adaptado de Goergen (2020).	12
Figura 2. Localização geográfica do local de estudo, no município de Sinop, estado do Mato Grosso, Amazônia do Brasil.	14
Figura 3. Descrição dos tratamentos e <i>timeline</i> do experimento com os sistemas agrícolas. SC – Sucessão de culturas: produção anual de soja seguido pelo milho e pousio do solo; ILP – Integração lavoura-pecuária: sistema de rotação de quatro anos, no primeiro ano foi mantido a produção de soja/milho, no segundo ano soja/milho + <i>Urochloa</i> , seguido por dois anos de <i>Urochloa</i> em pastejo de gado; PA – Pastagem manejada: área sob cultivo contínuo de <i>Urochloa</i> sob pastejo de gado.	15
Figura 4. Índice da saúde do solo (ISS) e contribuição ponderada dos componentes químico, biológico e físico (i) e scores médios dos componentes da saúde do solo avaliados pelo SMAF (ii) para as camadas de 0–5 (a), 5–10 (b), 10–20 (c) e 20–30 cm (d) sob manejos de sucessão de culturas (SC), integração lavoura-pecuária (ILP) e pastagem manejada (PA) na Amazônia do Brasil. Valores seguidos da mesma letra minúscula comparando os usos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras de erro indicam o erro padrão.	22
Figura 5. Índice de saúde do solo (ISS) e contribuição ponderada dos componentes químico, biológico e físico (a) e scores médios dos componentes do índice da saúde do solo avaliados pelo SMAF (b) para a camada de 0–30 cm sob manejos de sucessão de culturas (SC), integração lavoura-pecuária (ILP) e pastagem (PA) na Amazônia do Brasil. Valores seguidos da mesma letra minúscula ou com ausência de letras comparando os usos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras de erro indicam o erro padrão.	23

1. INTRODUÇÃO

O solo constitui o componente central para sustentabilidade e produtividade agrícola, funcionando como base viva que fornece às plantas água, nutrientes e suporte estrutural (Kundu; Biswas, 2025). Diante do aumento populacional global e da intensificação dos impactos sobre o meio ambiente, torna-se estratégico compreender o funcionamento dos ecossistemas agrícolas, pois esses sistemas ocupam posição central nos debates sobre sustentabilidade e segurança alimentar (Dong et al., 2026). Essa crescente preocupação global com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas tem direcionado pesquisas para a compreensão da qualidade do solo como elemento central na manutenção da produtividade e dos serviços ecossistêmicos (Cherubin et al., 2025a).

Um solo em bom estado funcional é aquele capaz de manter sua produtividade biológica, conservar os atributos ambientais e suportar organismos: plantas, fauna e comunidades humanas (Andrews et al., 2004; Mendes et al., 2021). O solo não funciona meramente como suporte físico dos cultivos, mas constitui a origem de quase toda a alimentação humana, mais de 95% dos alimentos consumidos, enquanto abriga aproximadamente um quarto de toda a vida do planeta em termos de biodiversidade (Kundu; Biswas, 2025). Essa condição edáfica figura como determinante crucial para maximizar a produção agrícola, manter a resiliência climática, preservar a estabilidade ecossistêmica e garantir sustentabilidade nas décadas futuras.

Os próximos 50 anos apresentarão desafios significativos ao setor agrícola, particularmente a necessidade de expandir a produção global de alimentos para acompanhar o crescimento populacional esperado (Silva et al., 2025). De acordo com projeções, a produção alimentar precisará crescer aproximadamente 60% até meados do século XXI. Contudo, essa expansão produtiva não pode desconsiderar a questão climática: as emissões agrícolas de gases do efeito estufa (GEE) tendem a aumentar em proporção similar, a menos que estratégias de mitigação robustas sejam implementadas (Guo et al., 2026). Frente a esses desafios entrelaçados de produção e mitigação, o solo assume importância estratégica indiscutível.

Estudos recentes indicam que um terço dos solos em escala global apresenta sinais severos de degradação, com impactos diretos sobre bilhões de pessoas,

plantas e animais (Sarkar et al., 2020; Kundu e Biswas, 2025). Essa realidade decorre da intensificação de atividades humanas nos últimos séculos, que aceleraram processos erosivos e de deterioração, resultando em perda expressiva da capacidade produtiva e das funções biogeoquímicas do solo. A degradação do solo caracteriza-se por múltiplas transformações: redução de teores de nutrientes, esgotamento de carbono, modificações na estrutura física (densidade, porosidade) e redução da capacidade de infiltração hídrica (Sarkar et al., 2020; Alves Ribeiro et al., 2025). Reconhecer as múltiplas causas da degradação edáfica é essencial para sua mitigação, visto que ela pode ocorrer através de processos naturais graduais ou ser acelerada pela interferência humana inadequada (Bocaleti et al., 2021).

O manejo inadequado e o uso insustentável representam fatores igualmente determinantes, frequentemente sendo os principais vetores de degradação em agroecossistemas (Bocaleti et al., 2021; Inacio et al., 2025). Para compreender essas transformações, é fundamental monitorar as alterações dos atributos do solo sob diferentes contextos: variações de uso da terra, tipos de cobertura vegetal, condições climáticas regionais e práticas de manejo agrícola (Inacio et al., 2025).

Em regiões tropicais, especialmente no bioma Amazônia, a conversão de vegetação nativa para usos agropecuários tem gerado impactos significativos sobre os atributos do solo, comprometendo sua capacidade de sustentar funções ecológicas essenciais (De Arruda Souza et al., 2024). O Brasil destaca-se como um dos principais atores da agricultura global, consolidando-se tanto como grande produtor quanto exportador de commodities agrícolas em zonas tropicais e subtropicais (Inacio et al., 2025).

Entretanto, essas regiões brasileiras têm enfrentado intensificação dos processos de desmatamento nas últimas décadas, configurando-se como cenário preocupante no contexto global de perda florestal do século XXI (Mendonça et al., 2026). Essa conversão de vegetação nativa para outros usos emerge como um dos principais fatores desencadeadores de degradação do solo, uma vez que remove a proteção florestal e expõe o solo a processos erosivos e de deterioração estrutural (Kundu; Biswas, 2025).

Esse processo de transformação na Amazônia desencadeia múltiplas consequências para os agroecossistemas: a remoção da cobertura vegetal acelera a

perda de capacidade produtiva, altera as dinâmicas populacionais de organismos, ampliando a proliferação de pragas agrícolas, e intensifica a dependência de insumos químicos sintéticos para manutenção da produção (Dong et al., 2026). Nesse contexto desafiador, aumentar e estabilizar a produtividade agrícola configura-se como tarefa complexa, visto que os solos tropicais apresentam limitações intrínsecas: naturalmente pobres em nutrientes biodisponíveis, como fósforo (P) e nitrogênio (N), que emergem como elementos particularmente críticos para o potencial produtivo nos agroecossistemas brasileiros (Alves Ribeiro et al., 2025). Diante desse cenário, torna-se fundamental avaliar a saúde do solo em diferentes sistemas de manejo, utilizando metodologias integradas que considerem indicadores físicos, químicos e biológicos.

A adoção de sistemas conservacionistas como o Sistema Plantio Direto (SPD) e a Integração Lavoura-Pecuária (ILP) surgiram como alternativas viáveis para a preservação da saúde do solo e mitigar os impactos ambientais (Inacio et al., 2025). O SPD configura-se como uma abordagem agrícola que potencializa tanto a quantidade quanto a qualidade da matéria orgânica presente na superfície do solo. Ao evitar o revolvimento do solo e manter a palha na superfície, o SPD ajuda na redução da erosão, preserva a umidade e aumenta o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) (Alves Ribeiro et al., 2025; Inacio et al., 2025).

Já o ILP é capaz de fornecer diversos serviços ecossistêmicos, aumentar a saúde do solo e diversificar a produção. Os sistemas ILP representam arranjos produtivos onde componentes agrícolas e pecuários coexistem na mesma parcela de terra, articulados por meio de mecanismos de rotação, sucessão ou consórcio que potencializam ganhos sinérgicos (Prado et al., 2025).

De modo semelhante, a adoção de pastagens sob condições de manejo técnico adequado, particularmente aquelas que incorporam forrageiras de elevado potencial produtivo como *Urochloa brizantha* associadas a práticas de controle nutricional e regulação da intensidade de pastoreio (De Oliveira et al., 2022; Tenelli et al., 2025) promove transformações significativas nos processos edáficos. Essas melhorias manifestam-se através do incremento de ciclagem de nutrientes, da estabilidade estrutural dos agregados edáficos e, conseqüentemente, da ampliação dos estoques de carbono no perfil do solo (Bieluczyk et al., 2020; Tenelli et al., 2025).

A multiplicidade de práticas de manejo agrícola contemporâneas impõe a necessidade de metodologias quantitativas robustas, capazes de integrar indicadores multidimensionais como subsídio para caracterização precisa do desempenho funcional dos solos. O Soil Management Assessment Framework (SMAF) permite uma análise combinada de atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Inicialmente desenvolvido para solos norte-americanos, o SMAF é uma ferramenta para avaliar os impactos do uso do solo e das práticas de manejo na saúde do solo (Andrews et al., 2004).

Para utilização no Brasil ele foi adaptado e aplicado com sucesso em diversas regiões (Cherubin et al., 2021; Lima et al., 2024). A aplicação do SMAF tem se consolidado como ferramenta confiável, fornecendo subsídios quantitativos para identificar como diferentes sistemas agrícolas impactam a funcionalidade do solo e para fundamentar estratégias de intensificação sustentável (Ruiz et al., 2020; Matos et al., 2022). Entretanto, ainda são escassas as pesquisas aplicando o SMAF em solos amazônicos sob interferência antrópica, representando uma lacuna importante no conhecimento científico regional.

Pesquisas recentes indicam que o SMAF é particularmente sensível para detectar mudanças na saúde do solo decorrentes de alterações de uso da terra em ambientes tropicais. Estudos conduzidos em sistemas silvopastoris da Amazônia colombiana demonstraram que, quando implementadas práticas adequadas de manejo, solos degradados apresentaram recuperação de qualidade comparável à vegetação nativa, evidenciando o potencial de recuperação através de arranjos produtivos integrados (Bermeo et al., 2022). Adicionalmente, análises recentes sobre a aplicabilidade dos algoritmos do SMAF em agroecossistemas tropicais apontam a necessidade de refinamento nos parâmetros de matéria orgânica e textura para otimizar a detecção de mudanças em solos com características específicas da região amazônica (Amorim et al., 2025), reforçando a relevância de estudos localizados que validem e adaptem a metodologia às condições pedoclimáticas do Brasil.

Com base no exposto, objetivou-se com este estudo avaliar a saúde do solo utilizando o SMAF em três sistemas agrícolas sob condições tropicais: sucessão de culturas (SC), integração lavoura-pecuária (ILP) e pastagem manejada (PA). A hipótese do estudo é que o sistema ILP apresenta melhores condições para a

manutenção e melhoria da saúde do solo, em comparação ao SC e PA. Essa expectativa se fundamenta na capacidade do ILP de integrar componentes agrícolas e pecuários, o que proporciona maior diversidade de plantas e entrada de resíduos orgânicos, favorecendo o equilíbrio entre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Saúde do solo

Nas últimas décadas, o solo ganhou destaque significativo entre pesquisadores e gestores públicos, motivado pelo interesse em compreender seu papel multifuncional. Dois termos têm aparecido frequentemente na literatura para descrever essa capacidade do solo: qualidade do solo e saúde do solo. Entretanto, o uso constante desses termos na comunicação científica e governamental raramente vem acompanhado de explicações claras sobre o que cada um realmente significa, prejudicando a compreensão precisa das informações apresentadas (Bonfante; Basile; Bouma, 2020).

Embora a qualidade do solo e a saúde do solo frequentemente apareçam como expressões intercambiáveis na literatura, essas expressões designam realidades distintas. A compreensão da qualidade do solo originou-se historicamente da necessidade de avaliar como o solo funciona em contextos agrícolas e ambientais específicos, considerando seus efeitos sobre a qualidade da água, a saúde das plantas e animais em diferentes ecossistemas. A qualidade do solo relaciona-se primordialmente ao desempenho de funções específicas do solo, isto é, ao que ele realiza. Por outro lado, a saúde do solo o compreende como um organismo vivo, dinâmico e finito, transcendendo uma visão meramente funcional para incorporar dimensões mais amplas de sustentabilidade planetária. Essa distinção revela-se particularmente importante quando se considera que o conceito de saúde do solo se comunica de forma mais acessível ao público em geral por meio da analogia com a saúde humana, refletindo a compreensão de que o solo, assim como o corpo humano, constitui um sistema biologicamente ativo e complexo (Lehmann et al., 2020; Bonfante; Basile; Bouma, 2020; Fausak et al., 2024).

O solo é fundamental para a manutenção do meio ambiente e dos ecossistemas, sendo constituído por sólidos, líquidos e gases que interagem por meio de atributos físicos, químicos e biológicos. Esses atributos são cruciais para a avaliação da saúde do solo, pois juntos estabelecem as condições apropriadas para desempenhar suas funções (Bocaleti et al., 2021; Goergen, 2020). Quando tais atributos sofrem alterações significativas, ocorre a degradação do solo, caracterizada pela redução de sua capacidade produtiva no ecossistema. Esse processo pode ocorrer de forma natural, mas é frequentemente intensificado pelo manejo inadequado. Assim, a saúde do solo é determinada não só por origem e formação, mas também pelo uso e manejo, podendo ser comprometida por estratégias agrícolas insustentáveis (Bocaleti et al., 2021).

Solos saudáveis são essenciais para a conservação dos serviços ecossistêmicos e do bem-estar humano, proporcionando multifuncionalidades que sustentam tanto a saúde planetária quanto a humana. Entretanto, a distribuição desigual das pesquisas globais sobre saúde do solo tem dificultado o desenvolvimento de soluções locais para garantir a segurança desse recurso (Cherubin et al., 2025a). Ainda de acordo com Cherubin et al. (2025b), a segurança do solo está ameaçada, pois um terço dos solos do planeta encontra-se degradado, um cenário provavelmente intensificado pelas mudanças climáticas. Essa degradação também pode ser resultada de múltiplas pressões antropogênicas: o desmatamento expõe o solo a processos erosivos e intensifica eventos hidrológicos extremos, enquanto práticas agrícolas baseadas em ciclos de limpeza vegetacional e queimadas controladas aceleram a perda de fertilidade natural e a remoção de camadas superficiais do perfil edáfico (Kundu; Biswas, 2025).

A saúde do solo reflete sua capacidade global de realizar as funções ecológicas esperadas e de tolerar pressões ambientais, sejam elas naturais ou decorrentes de intervenções agrícolas, como irrigação, movimentação do perfil edáfico e incorporação de compostos nutricionais (Fausak et al., 2024). Compreender a saúde do solo requer mais do que observações qualitativas; demanda a mensuração de componentes múltiplos, uma vez que o solo apresenta características complexas e multidimensionais (Lehmann et al., 2020).

Assim como ocorre com a saúde humana, avaliar a saúde do solo não é uma tarefa direta, mas torna-se possível por meio de diversos indicadores que a representem. Para que um parâmetro seja considerado indicador adequado de saúde do solo, ele deve atender a exigências específicas: deve reagir visualmente às transformações no manejo; apresentar correlação com os processos ecológicos do solo; colaborar na interpretação desses processos; mostrar aplicabilidade prática para quem trabalha com gestão de terras; e permitir medição economicamente acessível (Lehmann et al., 2020; Fausak et al., 2024).

O solo, como recurso natural de grande complexidade, tem seu potencial produtivo diretamente associado ao manejo sustentável. Frente aos impactos socioambientais das atividades agrícolas, cresce a importância de práticas mais sustentáveis focadas na segurança alimentar e na preservação ambiental (Bocaleti et al., 2021). Assim, a manutenção e a restauração da saúde do solo representam caminhos essenciais para assegurar segurança alimentar e climática em escala global (Cherubin et al., 2025a). As florestas tropicais, especialmente as da Amazônia, desempenham papel fundamental na regulação global do clima e na conservação da biodiversidade.

A Floresta Amazônica é a maior do planeta, abrangendo cerca de 700 milhões de hectares em nove países sul-americanos e abrigando aproximadamente um quarto da biodiversidade mundial (Silva-Olaya et al., 2022). O bioma também contribui para funções cruciais, como a regulação climática, o fornecimento de água doce e a provisão de importantes serviços ecossistêmicos. Entretanto, o desmatamento nas últimas décadas resultou na perda de cerca de 28,7 milhões de hectares de vegetação nativa, agravando a degradação do solo, a redução da biodiversidade e ampliando as desigualdades socioeconômicas e a insegurança alimentar de comunidades rurais (Silva-Olaya et al., 2022; Da Paixão Alves et al., 2025). O desmatamento ilegal constitui uma grande ameaça, comprometendo o futuro da produção agrícola e destacando a necessidade de práticas mais eficientes e sustentáveis (Rezende et al., 2025).

A saúde do solo no bioma Amazônico representa um desafio multifacetado, pois a degradação em regiões de alta perda florestal compromete a produtividade agrícola e a capacidade do solo de desempenhar suas múltiplas funções ecológicas

(Rodríguez-León et al., 2022). Soluções baseadas em recuperação ecológica e restauração florestal podem reverter significativamente a trajetória de degradação dos solos amazônicos, particularmente através do estabelecimento de florestas secundárias que incrementam o armazenamento de carbono e recuperam atributos edáficos (de Oliveira Lopes et al., 2024).

Pesquisas implementadas com uso de sistemas integrados em ambientes da Amazônia Colombiana mostram que a combinação de árvores e pastagens recuperadas pode resgatar indicadores de saúde do solo a níveis comparáveis aos de vegetação nativa (Bermeo et al., 2022). Quando implementadas práticas conservacionistas que restauram a cobertura florestal em áreas abandonadas, os indicadores de saúde do solo apresentam recuperação progressiva de seus componentes físicos, químicos e biológicos (Van der Sande et al., 2023). Essas evidências reforçam que estratégias baseadas na regeneração natural e no manejo adaptativo são caminhos viáveis para a recuperação da saúde dos solos amazônicos, oferecendo alternativas sustentáveis tanto para a segurança alimentar quanto para a conservação do bioma em escala regional e global.

2.2 Manejo do solo

Sistemas de cultivo pouco diversificados, como monoculturas ou sucessões simples de culturas, tendem a comprometer a estrutura e a fertilidade do solo ao longo do tempo, reduzindo sua capacidade de sustentar a biodiversidade edáfica, o sequestro de carbono e o equilíbrio ecológico. Diante disso, práticas diversificadas devem ser priorizadas, pois favorecem a melhoria e restauração da saúde do solo e de sua multifuncionalidade, ampliando o fornecimento de serviços ecossistêmicos (Souza et al., 2025; Turmel et al., 2015; Annabi et al., 2017).

A agricultura conservacionista surge como alternativa promissora, pois envolve práticas que contribuem para a sustentabilidade agrícola (Bocaleti et al. 2021). A implantação de pastagens em áreas degradadas também pode mitigar as mudanças climáticas e incrementar o estoque de carbono no solo. Atualmente, as pastagens ocupam cerca de 20% da superfície terrestre e desempenham papel ecológico importante no sequestro de carbono (Bai et al., 2020). Contudo, mudanças de uso da terra, como a conversão da Floresta Amazônica para pastagens extensivas, têm levado a degradações expressivas e reforçam o desafio do manejo sustentável desse bioma (Silva-Olaya et al., 2022). Dados recentes de mapeamento do uso da terra

indicam que 81,1% da região ainda conserva vegetação nativa, enquanto 15,8% estão dedicados à agropecuária, com predominância de pastagens extensivas de baixo rendimento (MapBiomas, 2025; de Arruda Souza et al., 2024).

Essa realidade evidencia tanto a pressão antrópica contínua quanto o potencial de recuperação por meio de sistemas conservacionistas. A conversão para pastagens mal manejadas intensifica processos de compactação e erosão e reduz drasticamente o teor de matéria orgânica, enquanto a adoção de pastagens bem manejadas, especialmente com gramíneas como *Urochloa brizantha*, pode elevar o estoque de carbono orgânico do solo em até 20% em dez anos (Bieluczyk et al., 2020; Tenelli et al., 2025).

Adicionalmente, sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) demonstram capacidade de restaurar a estrutura do solo e melhorar a ciclagem de nutrientes em camadas subsuperficiais, reduzindo a necessidade de insumos químicos (Tenelli et al., 2025). Em agroecossistemas tropicais em geral, como observado no sul do Brasil, sistemas de ILPF podem apresentar valores de *Soil Health Index* (ISS) até 30% superiores aos de monoculturas convencionais, devido ao aporte constante de resíduos orgânicos e à menor perturbação do solo (da Luz et al., 2019). Assim, embora o bioma enfrente desafios decorrentes do desmatamento e do manejo inadequado, a intensificação sustentável baseada em práticas conservacionistas e em sistemas integrados revela-se como caminho para conciliar produção agrícola e conservação ambiental.

Nos sistemas de produção agrícola do bioma Amazônia coexistem pastagens extensivas de baixa tecnificação, plantações de café e diferentes estágios de floresta secundária, que diferem quanto aos impactos sobre a qualidade do solo (Melo et al., 2017). Na região sul da Amazônia, estudos realizados cerca de 11 anos após o uso do fogo em áreas de floresta apontaram redução da qualidade morfológica e física do solo, sendo a conversão para pastagem a situação de maior dano estrutural. Em contraste, áreas conduzidas sob sistema de floresta secundária em pousio de aproximadamente nove anos apresentaram maior resiliência e uso mais sustentável, e, entre as práticas avaliadas, o cultivo de café destacou-se como a opção menos degradante para a qualidade do solo (Melo et al., 2017).

Em áreas do norte da Amazônia, a substituição de florestas naturais por sistemas agrícolas e pastagens tem sido associada a alterações expressivas na química do solo, incluindo, em alguns casos, aumento do pH em função da queima e remoção da vegetação, interferindo na dinâmica de nutrientes e na atividade microbiana (Pereira Uchôa et al., 2025). Já na periferia da Amazônia, a agricultura convencional tem sido relacionada a diversos desserviços ambientais, como desmatamento, perda de hábitat e esgotamento de nutrientes do solo, ampliando os desafios de sustentabilidade ambiental e de viabilidade socioeconômica, em especial sob cenários de aquecimento global (De Moura et al., 2021).

Em contrapartida, diferentes estratégias de manejo conservacionista e de restauração têm demonstrado potencial para mitigar esses efeitos negativos e favorecer a recuperação da saúde do solo em agroecossistemas amazônicos. Evidências da Amazônia colombiana indicam que pastagens abandonadas em sucessão natural e sistemas silvipastoris apresentam melhores condições estruturais, maior conteúdo de matéria orgânica e valores mais elevados de índices integrados de qualidade do solo quando comparados a pastagens extensivas (Bermeo et al., 2022; Vélez-Martín et al., 2022).

De forma semelhante, o estabelecimento de florestas secundárias em áreas anteriormente ocupadas por agricultura ou pastagens tem sido associado à recuperação gradual de atributos físicos, químicos e biológicos, com aumento dos estoques de carbono e restauração da multifuncionalidade do solo ao longo do tempo (de Oliveira Lopes et al., 2020; van der Sande et al., 2023). Somam-se a isso resultados que indicam que abordagens baseadas em serviços ecossistêmicos podem melhorar os indicadores de qualidade do solo em agrossistemas da periferia da Amazônia, contribuindo para enfrentar os desafios de sustentabilidade e de viabilidade desses sistemas (De Moura et al., 2021). Em conjunto, esses estudos reforçam que o tipo de manejo adotado nos sistemas de produção agrícola da Amazônia exerce influência direta sobre a saúde do solo e sustentam a importância de avaliações integradas em diferentes usos da terra, como as propostas neste trabalho para o bioma Amazônia.

2.3 Soil Management Assessment Framework (SMAF)

Com o objetivo de integrar diferentes indicadores de forma padronizada em um único sistema, Andrews et al. (2004) desenvolveram o *Soil Management Assessment*

Framework (SMAF), uma metodologia de avaliação da qualidade do solo operacionalizada em planilha eletrônica no Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, WA, EUA). Inicialmente desenvolvido para solos norte-americanos, o SMAF consiste em selecionar indicadores adaptados ao tipo de solo e ao clima local; transformar os valores medidos em *scores* normalizados entre 0 e 1, por meio de funções de resposta que relacionam as medições ao desempenho funcional do solo; e calcular um índice geral da saúde do solo (*Soil Health Index* – ISS) pela média ponderada desses *scores* (Andrews et al., 2004). No Brasil, o SMAF foi calibrado e aplicado em diversos agroecossistemas tropicais (Cherubin et al., 2016; Cherubin et al., 2021; Lima et al., 2024). Essa avaliação exige indicadores químicos, biológicos e físicos, em que os indicadores químicos podem apontar a disponibilidade de nutrientes para as plantas e influência na atividade microbiana (Mendes et al., 2021); os indicadores biológicos respondem rapidamente às alterações de manejo (Cherubin et al., 2016); os indicadores físicos são fundamentais na indicação de aeração, o desenvolvimento radicular e retenção hídrica (Ruiz et al., 2020).

O SMAF possui 13 indicadores que abrangem propriedades físicas, químicas e biológicas. Os indicadores físicos presentes são: densidade do solo (Ds), estabilidade macroagregada (AGS), água disponível para plantas (AWC) e espaço poroso preenchido com água (WFPS). Os indicadores químicos: pH, a condutividade elétrica e os teores de potássio (K), fósforo (P) e sódio (Na). E, por fim, os indicadores biológicos: atividade da β -glucosidase (BG), carbono da biomassa microbiana (CBM), carbono orgânico total (SOC) e nitrogênio potencialmente mineralizável (Andrews et al., 2004; Cherubin et al., 2016; Wienhold et al., 2009).

O SMAF opera através de um procedimento organizado em três etapas para caracterizar a saúde do solo (Figura 1): (i) seleção de indicadores que abrangem dimensões químicas, físicas e biológicas do solo; (ii) interpretação dos indicadores (curvas de pontuações não lineares), processo no qual os dados brutos das propriedades do solo, expressos em unidades distintas, são convertidos em valores padronizados (*scores*) que variam entre 0 e 1, utilizando funções matemáticas programadas na planilha de cálculo do SMAF; e (iii) integração dos indicadores em um índice geral da saúde do solo (ISS), facilitando a comparação entre distintos modelos de produção agrícola (Cherubin et al., 2016; Goergen, 2020).

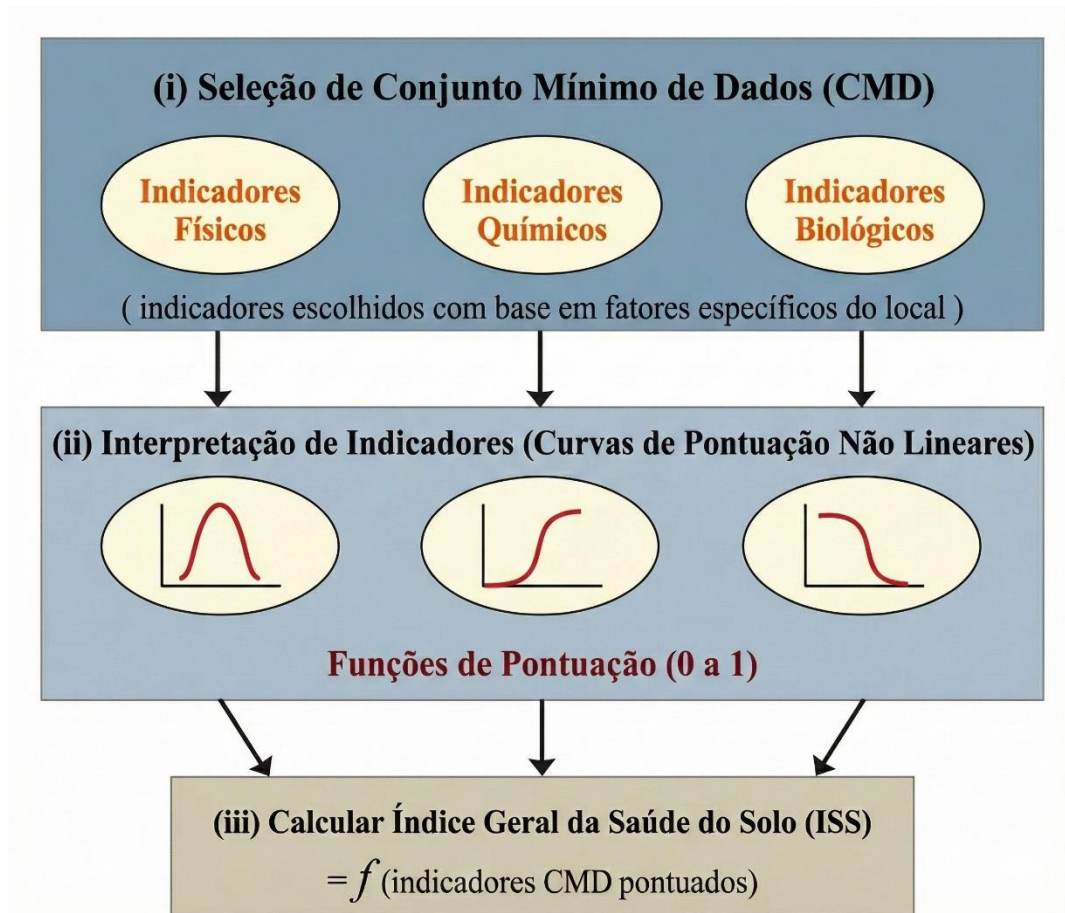


Figura 1. Estrutura e etapas na geração do índice de qualidade do solo pelo SMAF. Fonte: Adaptado de Goergen (2020).

Embora o SMAF apresente vantagens como diagnóstico holístico e comparabilidade objetiva de sistemas, recomenda-se cautela na aplicação em camadas subsuperficiais e a adaptação de curvas de resposta conforme textura, mineralogia e condições climáticas locais (Cherubin et al., 2016). Ainda assim, diferentes estudos em ambientes tropicais têm demonstrado que se trata de uma ferramenta adequada e sensível para a avaliação da saúde do solo. Em pastagens degradadas manejadas com sistemas silvipastoris na região amazônica colombiana, os scores SMAF evidenciaram de forma clara os benefícios da adoção desses sistemas, indicando que os arranjos silvipastoris configuram estratégias promissoras para a recuperação da saúde do solo (Bermeo et al., 2022).

De maneira semelhante, em áreas do Cerrado brasileiro, o SMAF foi eficiente para a definição dos valores de saúde do solo tanto nas pastagens quanto nos sistemas integrados, permitindo comparar o desempenho de diferentes manejos em

um mesmo referencial de análise (Maróstica, 2023). No sul do Brasil, o SMAF foi efetivamente capaz de quantificar e detectar mudanças na qualidade do solo induzidas pelo uso da terra e por sistemas de cultivo diversificados, reforçando seu potencial como ferramenta integrada para monitorar a qualidade e a saúde do solo em distintos contextos de manejo (Da Luz et al., 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área experimental da Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, Mato Grosso, Brasil (11°51'32.86" S; 55°36'57.99" O), com relevo plano (Figura 2). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (Santos et al., 2018) ou *Typic Hapludox* (Soil Survey Staff, 2022), de textura muito argilosa com 61, 63 e 68% de argila nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm, respectivamente (Viana et al., 2015). A mineralogia da fração argila é composta principalmente por caulinita e gibbsita, além de goethita, vermiculita com hidróxi-Al entre camadas e anatásio (Viana et al., 2015). A caracterização da área em condições iniciais apresenta-se na Tabela 1A. O clima da região é do tipo Aw – tropical com inverno seco, caracterizado por uma estação seca de maio a setembro, e chuvosa de outubro a abril, conforme classificação de Köppen (Alvares et al., 2013).

A área em estudo foi desmatada por volta do ano de 1990, sendo subsequentemente utilizada para cultivo agrícola sob sistema convencional, inicialmente com a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.), seguida pela soja [*Glycine max* (L.) Merr.]. No período de 2002 a 2007, adotou-se a sucessão soja–milho safrinha (*Zea mays* L.), enquanto entre 2007 e 2009 a soja foi sucedida pela cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.). Entre os anos de 2010 e 2011, a área permaneceu com ausência de cultivo, sem cobertura vegetal, sendo posteriormente implantado um sistema de plantio direto para a condução do experimento (Tenelli et al., 2025).

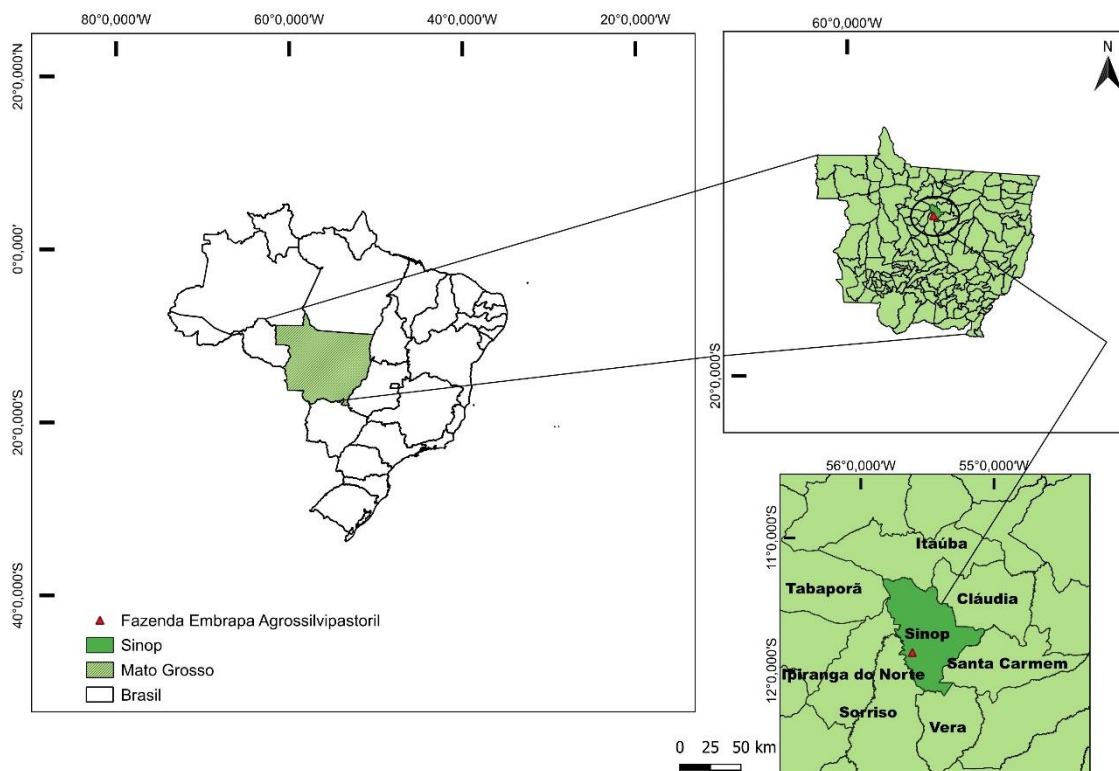


Figura 2. Localização geográfica do local de estudo, no município de Sinop, estado do Mato Grosso, Amazônia do Brasil.

O experimento foi implantado em 2011, considerando o delineamento experimental em blocos casualizados com três tratamentos e quatro repetições, totalizando 12 parcelas experimentais de aproximadamente um hectare (1 ha) cada. Os tratamentos foram: Sucessão de culturas (SC), com cultivo anual de soja (*Glycine max* L.) seguido de milho (*Zea mays*), implantados em sistema de plantio direto, permanecendo posteriormente em pousio; Sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) em ciclo de rotação de quatro anos, com soja seguida de milho em consórcio com *Urochloa* (*Urochloa Brizantha* cv. Marandu) implantados em sistema de plantio direto nos dois primeiros anos, seguido de dois anos consecutivos com *Urochloa* sob pastejo bovino; Pastagem manejada (PA), composta por cultivo contínuo de *Urochloa* sob pastejo bovino contínuo. Durante o período experimental, foram adicionados fertilizantes e cal para todos os tratamentos com base no estado de fertilidade do solo e nas necessidades das culturas (Tabela 2A).

Nos sistemas ILP e SC a soja foi plantada em outubro, com uma distribuição de 10 plantas por metro e espaçamento de 0,45 m entre linhas. Após a colheita da soja, realizada em fevereiro de cada ano, foi feita a semeadura do milho, com uma

distribuição de três plantas por metro, (mantendo o espaçamento e em consórcio com o *Urochloa* no sistema ILP). A colheita do milho ocorreu em junho, enquanto o *Urochloa* permaneceu na área por dois anos no ILP. O tratamento PA foi implantado com taxa de 4 kg ha⁻¹ de sementes de *Urochloa* e o manejo da pastagem foi realizado com bovinos de corte em pastejo contínuo, ajustando a taxa de lotação de acordo com a disponibilidade de forragem para manter a altura do dossel a 30 cm (Figura 2).

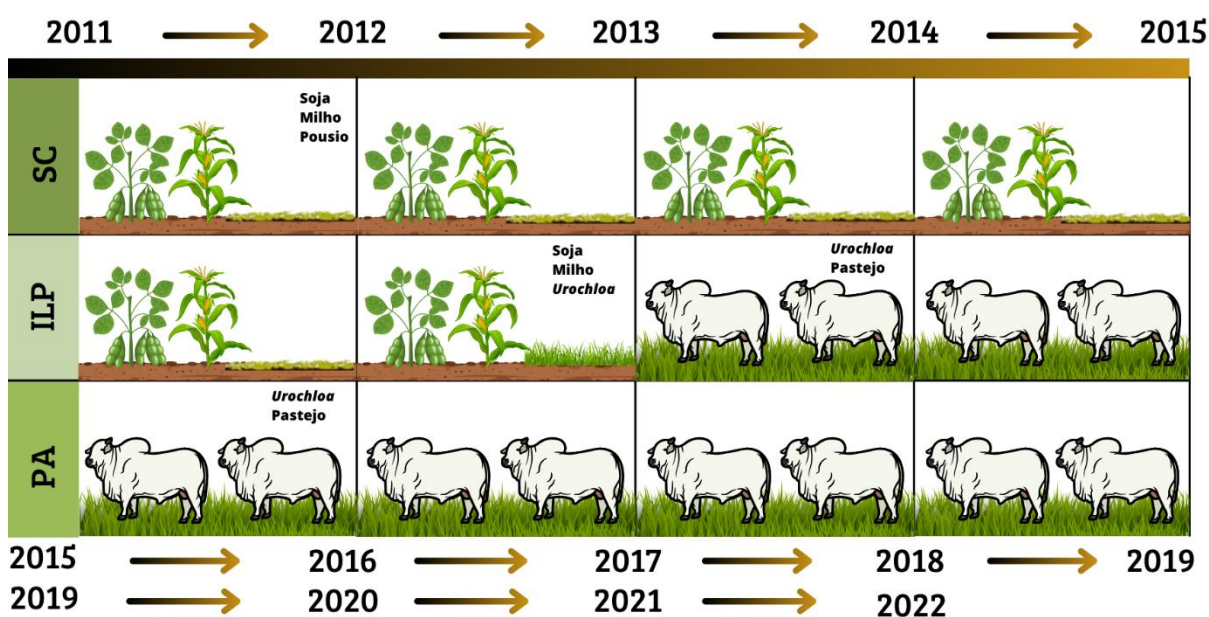


Figura 3. Descrição dos tratamentos e linha do tempo do experimento de longa duração com os sistemas agrícolas. SC – Sucessão de culturas: produção anual de soja seguido pelo milho e pousio do solo; ILP – Integração lavoura-pecuária: sistema de rotação de quatro anos, no primeiro ano foi mantido a produção de soja/milho, no segundo ano soja/milho + *Urochloa*, seguido por dois anos de *Urochloa* em pastejo de gado; PA – Pastagem manejada: área sob cultivo contínuo de *Urochloa* sob pastejo de gado.

3.2. Amostragem e análises do solo

Em julho de 2022, após 11 anos de implementação dos sistemas, amostras de solo deformadas foram coletadas para análises dos atributos químicos e biológicos. Adicionalmente, amostras indeformadas foram coletadas em anéis cilíndricos (5 cm de diâmetro interno e 5 cm de altura) utilizando um amostrador do tipo *Uhland* para determinação da densidade de solo. A amostragem foi realizada em cada uma das 12 parcelas experimentais, distribuídas em delineamento em blocos casualizados com

três tratamentos e quatro repetições, considerando as camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–30 cm, totalizando 48 amostras.

Os indicadores químicos do solo foram determinados conforme van Raij et al. (2001). O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado em CaCl_2 (solução de 0,01 mol L⁻¹) e o fósforo (P) e potássio (K) foram extraídos pelo método da resina de troca iônica. Como indicadores biológicos do solo foram avaliados o carbono orgânico do solo (SOC), o carbono da biomassa microbiana (CBM) e a β -glicosidase (BG). Para a análise do SOC, as amostras deformadas foram secas ao ar, passadas em peneiras com malha de 2 mm e moídas em almofariz de ágata. As concentrações de C foram analisadas por combustão a seco por meio do analisador elementar – LECO CN- 628 e os estoques de C foram calculados utilizando o método de massa equivalente (Ellert e Bettany, 1995).

Para o CBM, as amostras deformadas foram coletadas usando uma espátula e passadas em peneiradas com malha de 2 mm e mantidas a 4°C. O CBM foi obtido pelo método de fumigação-extração com clorofórmio (Vance et al., 1987). Foram pesadas duas porções de 10 g de solo seco, uma das quais foi fumigada com clorofórmio, enquanto a outra não foi fumigada. Após extração com K_2SO_4 (0,5 mol L⁻¹), a CBM foi determinada pela reação com dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), catalisada por digestão ácida (H_2SO_4 e H_3PO_4) e titulação com sulfato ferroso amoniacal [$(\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ 0,0333 mol L⁻¹] entre as amostras fumigadas e não fumigadas. Na outra subamostra, a umidade do solo gravimétrica foi determinada para corrigir o solo em base seca, pesando 10 g de solo e secando-o a 105 °C por 24 horas. A CBM foi expressa em mg C kg⁻¹ de solo seco. Os extratos foram analisados quanto ao teor de C orgânico. Após a extração, o CBM foi determinado pela diferença entre o C extraído das amostras fumigadas e não fumigadas. A BG foi determinada com base na quantificação colorimétrica de p-nitrofenol liberado para a enzima específica avaliada (Tabatabai, 1994).

Como indicador físico foi utilizada a densidade do solo (Ds), obtida pela razão entre o peso seco da amostra indeformada (após secagem em estufa a 105°C) e o volume do cilindro (Grossman e Reinsch, 2002).

3.3. Avaliação da saúde do solo

A ferramenta *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) foi usada para avaliar os efeitos dos sistemas agrícolas na saúde do solo. O SMAF adota um

processo estruturado para avaliar a saúde do solo em três etapas: (i) seleção de indicadores de saúde do solo relevantes (químicos, biológicos e físicos), considerando a função do solo e as condições específicas do ambiente estudado; (ii) interpretação dos indicadores por meio de curvas de pontuação, convertendo os valores medidos em scores padronizados que variam de 0 a 1; e (iii) integração dos indicadores em um índice geral da saúde do solo (ISS), permitindo uma avaliação comparativa dos diferentes sistemas agrícolas.

A SMAF inclui algoritmos para 13 indicadores de saúde do solo. Esses indicadores são importantes para a funcionalidade do solo e têm sido constantemente relatados na literatura (Andrews et al., 2004; Cherubin et al., 2016; Mendes et al., 2021). A seleção dos indicadores consiste nas diretrizes da SMAF, que recomenda utilizar pelo menos um indicador de cada componente do solo (químico, biológico e físico) (Andrews et al., 2004).

Foram selecionados sete indicadores de saúde do solo: pH, P e K como indicadores químicos; SOC, CBM e BG como indicadores biológicos; e Ds como indicador físico. O pH, P e K fornecem informações sobre a acidez do solo e a disponibilidade de nutrientes. O SOC desempenha um papel essencial em diversos processos, desde a ciclagem e o armazenamento de nutrientes até a formação de agregados do solo, além de ser uma fonte vital de energia para os organismos que habitam o solo. O CBM é um parâmetro essencial para medir as atividades metabólicas dos microrganismos presentes no solo, enquanto a BG indica a atividade bioquímica do solo. A Ds é um indicador fundamental que reflete diversas propriedades físicas do solo, como a capacidade de aeração, a taxa de infiltração da água e a dinâmica do crescimento das raízes (Cherubin et al., 2016; Da Luz et al., 2024; Ruiz et al., 2020).

A pontuação dos indicadores ocorreu mediante a transformação dos valores medidos para uma escala entre 0 e 1 (0 a 100%), de acordo com as equações desenvolvidas por Andrews et al. (2004), Wienhold et al. (2009) e Stott et al. (2010) (Tabela 3A). Além do valor medido de cada indicador, as equações levam em conta fatores específicos de solo e clima, como, por exemplo, o potencial de acúmulo da matéria orgânica do solo (MOS), textura do solo, clima, declividade (%), localização, mineralogia, classe de intemperismo, cultura, período de amostragem e a influência de metodologias analíticas em diferentes valores-limite (Andrews et al., 2004; Cherubin et al., 2016).

Neste estudo, a classe de MOS recebeu o valor 4 (baixo potencial acúmulo de matéria orgânica) para todos os tratamentos. O fator textura recebeu o valor 5 (teor de argila > 60%). O fator clima recebeu o valor 1 (precipitação média anual de ≥ 550 mm) para o local do estudo. O fator estação recebeu o valor 2 (amostragem no verão). O teor de óxido de ferro teve o valor 2 (outros solos). O fator mineralogia recebeu o valor 3 (argila 1:1 e óxidos de Fe e Al). Os fatores de declive e intemperismo foram de 2 (declive de 2-5% e alto intemperismo, respectivamente). O fósforo extraível (P) foi medido usando o método de resina (Classe 5).

Novos fatores de “cultura” que foram adequados as pontuações de pH e P de acordo com Cantarella et al. (2022), foram adicionados à planilha SMAF para abranger a cultura do milho dos usos de solo SC e ILP. Os limites para o “ajuste” foram estabelecidos com base na literatura. Os valores ótimos (parâmetros *b*) de pH e P foram de 6 e 40 mg dm⁻³, respectivamente. O algoritmo da SMAF é baseado no pH da água e, portanto, o pH em cloreto de cálcio foi convertido para pH em água pela soma de meia unidade (0,5). A curva de pontuação SMAF para K (Wienhold et al., 2009) é rígida com as classes de recomendação K adotadas no Brasil (van Raij et al., 1997).

Para avaliar a qualidade geral do solo, foi elaborado um índice que soma as pontuações dos diversos indicadores e as divide pelo total de indicadores em cada camada do solo. Este índice geral da saúde do solo foi dividido em três categorias: indicadores químicos (pH, P e K), indicadores físicos (Ds) e indicadores biológicos (SOC, CBM e BG). Cada uma dessas categorias contribuiu proporcionalmente (33,33%) para a composição do índice geral de saúde do solo (ISS), usando uma abordagem aditiva ponderada (Eq.1), independentemente da quantidade de indicadores, conforme indicado por Cherubin et al. (2022). O ISS médio para a camada integrada de 0–30 cm foi obtido pela média aritmética dos valores de ISS calculados para as quatro profundidades avaliadas (0–5, 5–10, 10–20 e 20–30 cm).

$$\text{Eq. 1: } ISS = \sum SiWi$$

onde *Si* é a pontuação do indicador e *Wi* é o valor ponderado dos indicadores.

3.4. Análise estatísticas

A avaliação da normalidade dos dados foi realizada com o teste de Shapiro-Wilk, adotando-se um nível de significância de 5%, enquanto a homogeneidade foi verificada por meio do teste de Bartlett. Com os pressupostos atendidos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) para determinar os efeitos dos diferentes usos do solo

sobre as variáveis analisadas (teste F, $p < 0,05$). Quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Todos os procedimentos estatísticos foram conduzidos no software R (R Core Team, 2020).

4. RESULTADOS

4.1. Indicadores de saúde do solo e scores SMAF

Os resultados dos indicadores de saúde do solo e os respectivos scores calculados pelo SMAF. De forma geral, os sistemas agrícolas avaliados apresentaram diferenças notáveis quanto à saúde do solo ao longo do perfil avaliado (0–30 cm) (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios dos indicadores de saúde do solo e scores SMAF (*Soil Management Assessment Framework*) para sistemas agrícolas no bioma Amazônia.

Camada cm	Uso do solo	pH	P	K mg dm ⁻³	SOC %	CBM mg kg ⁻¹	BG mg g ⁻¹ h ⁻¹	Ds kg dm ⁻³
Valores dos indicadores								
0-5	SC	6,07 ^{ns}	33,80 ^{ns}	93,25 ^{ns}	3,00 b	261,13 b	56,34 b	1,18 ^{ns}
	ILP	6,00	27,70	67,64	3,82 a	425,59 a	70,23 a	1,23
	PA	5,86	22,68	63,44	4,06 a	501,32 a	67,00 ab	1,22
5-10	SC	4,99 ^{ns}	22,80 ^{ns}	28,74 ^{ns}	2,15 ^{ns}	145,93 b	8,71 b	1,23 ^{ns}
	ILP	5,48	17,68	30,36	2,27	295,58 a	15,62 a	1,25
	PA	5,25	6,53	32,75	2,52	282,90 a	18,02 a	1,20
10-20	SC	4,68 ^{ns}	3,80 ^{ns}	25,71 ^{ns}	1,63 ^{ns}	84,03 b	5,30 b	1,26 ^{ns}
	ILP	5,09	3,68	23,26	1,62	144,67 ab	4,94 b	1,21
	PA	4,83	4,55	25,02	1,54	228,11 a	11,61 a	1,24
20-30	SC	4,65 b	2,75 ^{ns}	27,08 ^{ns}	1,35 ^{ns}	104,49 b	4,01 b	1,24 ^{ns}
	ILP	4,98 a	2,10	27,47	1,15	160,14 a	4,98 b	1,18
	PA	4,76 ab	2,30	20,14	1,36	180,99 a	11,82 a	1,13
Scores SMAF								
0-5	SC	0,99 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,88 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,84 ^{ns}
	ILP	0,98	0,88	0,79	1,00	1,00	0,10	0,73
	PA	0,91	0,88	0,77	1,00	1,00	0,09	0,76
5-10	SC	0,80 b	0,79 a	0,47 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,63 b	0,02 ^{ns}	0,73 ^{ns}
	ILP	0,93 a	0,72 ab	0,49	1,00	0,99 a	0,03	0,68
	PA	0,95 a	0,21 b	0,50	1,00	0,96 a	0,03	0,79
10-20	SC	0,68 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,28 b	0,02 b	0,70 ^{ns}
	ILP	0,82	0,05	0,40	0,94	0,61 ab	0,02 b	0,79
	PA	0,80	0,10	0,42	0,94	0,91 a	0,03 a	0,72
20-30	SC	0,67 b	0,02 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,85 ^{ns}	0,34 b	0,02 b	0,72 ^{ns}
	ILP	0,79 a	0,01	0,45	0,75	0,72 a	0,02 b	0,83

PA	0,75 ab	0,01	0,36	0,86	0,82 a	0,03 a	0,92
----	---------	------	------	------	--------	--------	------

SC: sucessão de culturas; ILP: integração lavoura-pecuária; PA: pastagem manejada; pH: potencial hidrogeniônico; P: fósforo; K: potássio; SOC: carbono orgânico do solo (SOC); CBM: carbono da biomassa microbiana; BG; β -glucosidade; Ds: densidade do solo. Para cada camada de solo médias seguidas por diferentes letras diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} = diferenças não significativas.

A pastagem manejada (PA) e integração lavoura-pecuária (ILP) se destacaram com melhores desempenhos na maioria dos indicadores analisados, especialmente nos atributos biológicos. Esses resultados evidenciam a maior sensibilidade dos indicadores biológicos às diferenças entre os sistemas, em contraste com os indicadores químicos e físicos, que apresentaram menor variação.

O pH do solo apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) entre os usos do solo apenas na camada de 20–30 cm, com valores mais elevados no ILP (4,98) em comparação com a SC (4,65), mas sem diferença estatística em relação à PA (4,76). Essa tendência foi refletida nos *scores* SMAF do pH do solo para essa profundidade, com valores de 0,79, 0,67 e 0,75 para ILP, SC e PA, respectivamente. Embora na camada de 5-10 cm o pH não tenha diferido entre os usos, os *scores* SMAF para pH foram significativamente maiores nos sistemas ILP (0,93) e PA (0,95) em comparação ao SC (0,80). Os teores de P e K do solo não variaram entre os sistemas agrícolas em nenhuma das camadas analisadas. Contudo, o *score* SMAF para o P foi significativamente maior em SC (0,79) na camada de 5-10 cm em comparação com PA (0,21).

O teor de SOC diferiram apenas na camada de 0–5 cm, com maiores valores em PA (4,06%) e ILP (3,82%) comparados com SC (3,00%) (Tabela 1). Apesar disso, os *scores* SMAF para SOC não diferiram entre os usos de solo em nenhuma profundidade, mantendo-se entre 0,75 e 1,0.

Os maiores contrastes entre os sistemas agrícolas foram observados nos atributos biológicos, particularmente no CBM e BG. Os sistemas ILP e PA apresentaram incrementos nos valores de CBM em relação a SC variando entre 153% e 202% nas camadas de 0–5, 5–10 e 20–30 cm. Na camada de 10–20 cm, o aumento do CBM em PA foi de 271% em relação a SC. Com exceção da camada de 0–5 cm, os *scores* SMAF para CBM, refletiram essas diferenças, com maiores valores no ILP (0,99 e 0,72) e PA (0,96 e 0,82), comparados a SC (0,63 e 0,34) nas camadas de 5–

10 e 20–30 cm, respectivamente. Na camada de 10-20 cm, o score foi de 0,91 em PA e 0,28 em SC (Tabela 1).

A atividade da BG apresentou os menores valores para SC em todas as camadas, assim como em ILP nas camadas de 10–20 e 20–30 cm. Os maiores valores foram observados em ILP ($70,23 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) na camada de 0–5 cm; em ILP ($15,62 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e PA ($18,02 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) na camada de 5–10 cm; e em PA ($11,61$ e $11,82 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) nas camadas de 10-20 e 20-30 cm (Tabela 1).

O indicador físico de densidade do solo (Ds) não foram alterados entre os usos em nenhuma camada, com valores variando entre $1,13$ e $1,26 \text{ kg dm}^{-3}$ (Tabela 1). Consequentemente, os scores SMAF para Ds não diferiram, situando-se entre 0,72 e 0,92.

4.2. Componentes e índice de saúde do solo

Os valores do índice de saúde do solo (ISS), a contribuição ponderada de seus componentes (químico, biológico e físico) e os scores médios desses componentes estimados pelo SMAF para as diferentes camadas do solo são descritos na Figura 4. Dentre os componentes do ISS, apenas o biológico foi influenciado pelos sistemas na maioria das profundidades, exceto na camada superficial 0–5 cm, onde não observou-se variação. Nas camadas de 0–5 e 0–30 cm, PA e ILP apresentaram maiores médias de score biológico ($0,70 \pm 0,00$ em ambos os casos) em comparação à sucessão de culturas ($0,67 \pm 0,01$). Já nas camadas de 10–20 e 20–30 cm, a pastagem apresentou valores superiores ($0,62 \pm 0,02$ e $0,57 \pm 0,01$) em relação à sucessão de culturas ($0,42 \pm 0,03$ e $0,40 \pm 0,03$).

Na camada de 5–10 cm, os usos ILP e PA aumentaram os scores do componente biológico em comparação com SC, de $0,55 \pm 0,01$ para $0,67 \pm 0,00$ e $0,66 \pm 0,01$, respectivamente (Figura 4b-ii). Esse incremento resultou em um aumento de 4% no ISS devido à maior contribuição ponderada do componente biológico (Figura 4b-i). Apesar disso, o ISS total não diferiu entre os sistemas agrícolas, variando entre 0,66 e 0,69.

Na camada de 10–20 cm, a PA aumentou o score SMAF do componente biológico de $0,42 \pm 0,03$ (SC) para $0,62 \pm 0,02$ (Figura 4-ii), contribuindo com um acréscimo de 7% no ISS (Figura 4c-i). Assim, o ISS geral da PA alcançou valor de 0,60, representando um aumento de 10% em relação a SC (0,50).

Na camada de 20–30 cm, o aumento no *score* biológico também foi expressivo na PA ($0,57 \pm 0,01$) em comparação a SC ($0,40 \pm 0,03$) (Figura 4d-ii). A contribuição ponderada do componente biológico no ISS foi de 0,13 (SC), 0,17 (ILP) e 0,19 (PA), com diferenças significativas entre os sistemas (Figura 4d-i). Como consequência, o ISS geral atingiu 0,62 no ILP e 0,58 na PA, ambos significativamente superior a SC (0,50).

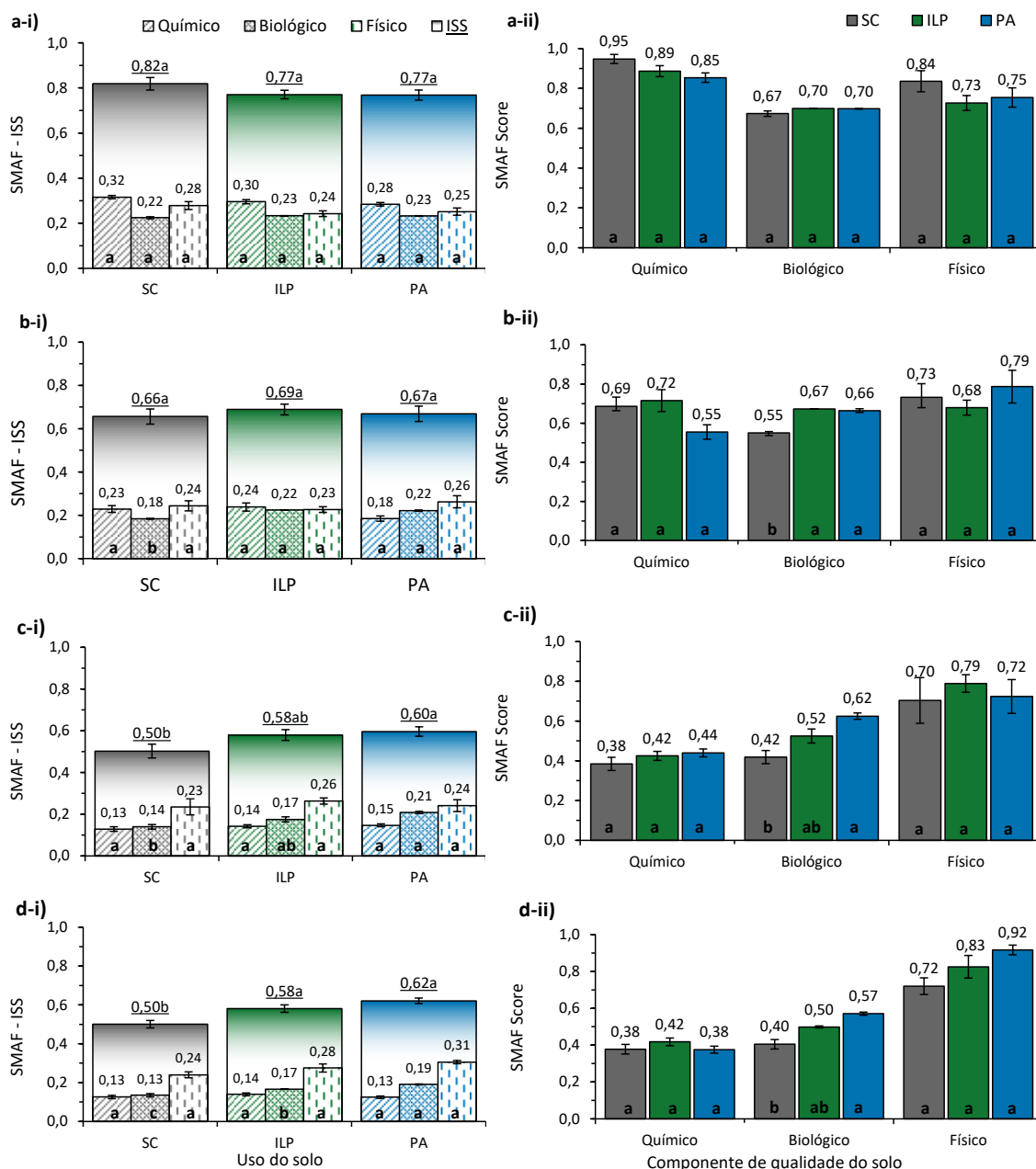


Figura 4. Índice da saúde do solo (ISS) e contribuição ponderada dos componentes químico, biológico e físico (i) e scores médios dos componentes da saúde do solo avaliados pelo SMAF (ii) para as camadas de 0–5 (a), 5–10 (b), 10–20 (c) e 20–30 cm (d) sob manejos de sucessão de culturas (SC), integração lavoura-pecuária (ILP) e pastagem manejada (PA) na Amazônia do Brasil. Valores seguidos da mesma letra

minúscula comparando os usos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras de erro indicam o erro padrão.

De modo geral, ao considerar todo o perfil 0–30 cm, não houve variação na média ponderada do ISS entre os sistemas agrícolas avaliados (Figura 5a). No entanto, os sistemas PA e ILP apresentaram os maiores scores para o componente biológico, com valores de 0,64 e 0,60, respectivamente, enquanto o SC obteve o menor score, com 0,51 (Figura 5b).

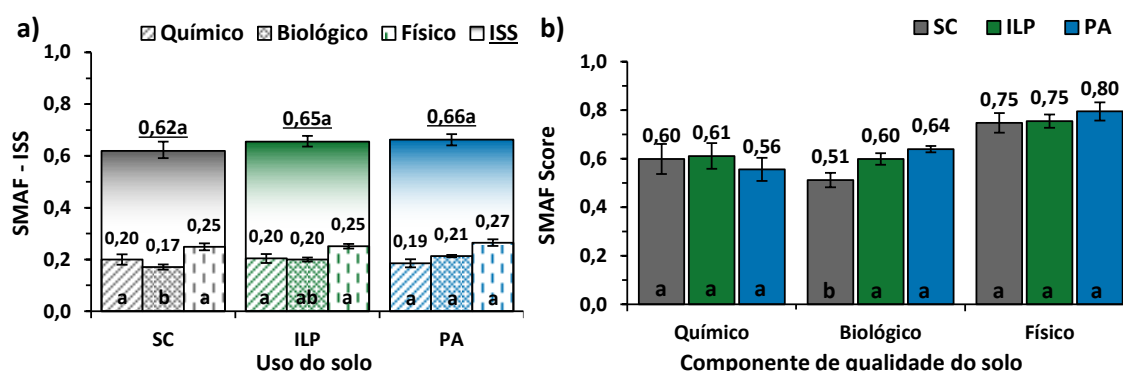


Figura 5. Índice de saúde do solo (ISS) e contribuição ponderada dos componentes químico, biológico e físico (a) e scores médios dos componentes do índice da saúde do solo avaliados pelo SMAF (b) para a camada de 0–30 cm sob manejos de sucessão de culturas (SC), integração lavoura-pecuária (ILP) e pastagem (PA) na Amazônia do Brasil. Valores seguidos da mesma letra minúscula ou com ausência de letras comparando os usos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras de erro indicam o erro padrão.

5. DISCUSSÃO

5.1. Efeitos dos sistemas agrícolas nos indicadores de saúde do solo

Indicadores químicos do solo

O pH baixo das camadas de 5–10 cm até 20–30 cm (Tabela 1) demonstra a característica dos solos tropicais, e pode ser atribuído ao acúmulo e, subsequentemente, à decomposição lenta da MO que libera ácidos orgânicos (Mitsuta et al., 2025). Os resultados encontrados de pH nas camadas de 10–20 cm e 20–30 cm indicam a necessidade de intervenções para a correção do solo, conforme os critérios recomendados pelo manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação (Villar, 2007). De acordo com Cherubin et al. (2011), as

principais causas químicas da acidez do solo incluem a precipitação (devida à dissociação do ácido carbônico), a aplicação intensiva de fertilizantes nitrogenados, como ureia e sulfato de amônio, além das perdas de nitrogênio e cátions, como cálcio, potássio e magnésio, por lixiviação.

O SMAF revelou variações nos scores dos indicadores químicos (pH e P) (Tabela 1). Como mencionado anteriormente, foi necessário adaptar um novo “fator de cultivo ajustado” à planilha denominada “SC/ILP – Milho”. Os resultados deste estudo mostraram menores teores de P nas camadas inferiores. Considerando que, no sistema plantio direto, a aplicação localizada de fertilizantes e as menores perdas por erosão resultam em maior acúmulo de nutrientes na superfície do solo, especialmente de P, os teores desse nutriente podem ser até 10 vezes maiores em comparação às camadas subsuperficiais (Michelom et al., 2019).

Os menores teores de P observados nas camadas inferiores podem ser explicados pela combinação entre a baixa mobilidade desse nutriente no perfil do solo e o histórico de fertilização adotado nos sistemas avaliados. Embora tenham sido realizadas aplicações recorrentes de fertilizantes fosfatados ao longo do período experimental, as doses variaram entre os anos e os tratamentos, sendo geralmente maiores nos sistemas com produção de soja e milho (SC e ILP) do que na pastagem (Tabela 2A). Como a adubação foi realizada predominantemente na superfície do solo e o fósforo apresenta reduzida movimentação vertical, ocorreu o acúmulo desse nutriente nas camadas superficiais, resultando em menores concentrações nas profundidades de 10–20 e 20–30 cm (Tabela 1) (Goergen, 2020). Além disso, a combinação de insumos orgânicos pode favorecer a retenção de P no solo, contribuindo para a melhoria das propriedades químicas em solos ácidos (Matos et al., 2022).

Os teores de P e K não apresentaram alterações significativas entre os tratamentos, com maior acúmulo desses nutrientes na camada de 0–5 cm (Tabela 1), devido às aplicações superficiais de fertilizantes e à decomposição de resíduos vegetais na superfície do solo (Cherubin et al., 2015; Olibone e Roolem, 2010; Barcellos et al., 2015). Em nosso estudo, essa estratificação foi especialmente evidente para o P, que permaneceu concentrado na camada superficial, indicando baixa redistribuição em profundidade. Por outro lado, a presença de espécies de *Urochloa* nos sistemas integrados tende a favorecer a exploração de camadas mais profundas e a ciclagem de K e de outros cátions ao longo do perfil, por meio de um

sistema radicular denso e do aporte contínuo de resíduos com elevado teor de nutrientes, como observado em sistemas de integração lavoura-pecuária com *Urochloa brizantha* em solos arenosos tropicais (Soares et al., 2023). O potencial das culturas de cobertura na reciclagem de nutrientes está ligado, entre outros fatores, à sua eficiência na absorção de nutrientes do solo e no armazenamento desses elementos na biomassa vegetal (De Sousa et al., 2023).

Indicadores biológicos do solo

Os indicadores biológicos da saúde do solo podem se alterar rapidamente em função das práticas agrícolas específicas e das decisões de sistemas agrícolas adotados, além de variarem consideravelmente com as estações do ano (Matos et al., 2022). No presente estudo, essa sensibilidade foi evidenciada principalmente nos sistemas de sucessão de culturas (SC) e integração lavoura-pecuária (ILP), que apresentaram diferenças importantes nos atributos biológicos em comparação com a pastagem manejada (PA), considerada um sistema de maior estabilidade.

A comparação entre os sistemas revelou que o cultivo de soja e milho (SC) resultou em menores teores de SOC na camada superficial (0–5 cm) e de CBM em todas as camadas avaliadas (Tabela 1), em relação aos sistemas ILP e PA. A biomassa microbiana, sua atividade e o carbono orgânico do solo são atributos biológicos que respondem com maior rapidez a alterações no solo, sendo os primeiros a apresentarem reduções em contextos de intensificação agrícola ou distúrbios (Siqueira et al., 2021). Assim, os menores valores (SOC e CBM) observados no SC refletem os efeitos do preparo reduzido, da diversidade vegetal e do menor aporte de resíduos orgânicos, em comparação aos demais sistemas avaliados. Ainda de acordo com Siqueira et al. (2021), a soja sendo uma leguminosa apresenta altos teores de N em sua biomassa e relação C/N baixa, tendo então uma rápida decomposição da palhada, que por sua vez, pode contribuir para a menor retenção de carbono no solo, como observado na última camada 20-30 cm (Tabela 1).

O uso de leguminosas e gramíneas contribui para o aumento da matéria orgânica no solo, favorecendo o acúmulo de carbono da biomassa microbiana (CBM) nos sistemas ILP e PA (Tabela 1). O CBM é um indicador biológico sensível e eficaz, pois atua como um reservatório de nutrientes de rápida disponibilidade e como fonte energética para a biota do solo, sendo amplamente utilizado na avaliação da fertilidade (Bai et al., 2020). Apesar de não terem sido observadas variações no score

SMAF do CBM entre ILP e PA (Tabela 1), esse comportamento pode estar relacionado à presença da *Urochloa* em ambos os sistemas, contribuindo para o aumento da biomassa microbiana devido à alta produção de raízes, maior exsudação radicular e acúmulo de resíduos orgânicos, promovendo um ambiente mais favorável à atividade microbiana no solo (Bai et al., 2020).

A *Urochloa*, em especial, apresenta um sistema radicular denso e bem distribuído ao longo do perfil do solo, o que contribui significativamente para a formação e estabilidade da matéria orgânica (Gazolla et al., 2015). O maior valor de *score* do CBM em ILP e PA está relacionado com o maior aporte de fitomassa da *Urochloa*. Quando há menor adição de fitomassa residual ao solo, como em sistemas conduzidos com ausência de cultivo no inverno e/ou verão, os microrganismos passam a utilizar o carbono armazenado na matéria orgânica como principal fonte de energia para sua manutenção (Pillon et al., 2020). Durante esse processo, parte do carbono é oxidado, resultando na liberação de CO₂ e água, caracterizando a taxa básica de mineralização anual da matéria orgânica do solo (Pillon et al., 2020). No sistema SC, conduzido com ausência de cultivo em determinadas épocas do ano, os valores de CBM foram os menores em comparação aos demais tratamentos, independentemente da profundidade.

Estudos apontam que a conversão de vegetação nativa em pastagens bem manejadas pode promover o aumento dos teores de carbono orgânico no solo (SOC) ao longo do tempo, especialmente após a implantação de gramíneas forrageiras na região amazônica (Bieluczyk et al., 2020; Carvalho et al., 2010; Tenelli et al., 2025). O SOC no sistema PA apresentou valores relativamente altos e sem variação estatística significativa ao longo do perfil, em comparação aos demais sistemas avaliados (Tabela 1). Esses resultados indicam que o uso de gramíneas tem alta capacidade de acumular e distribuir carbono no solo, mesmo sob condições de uso agrícola. As gramíneas apresentam uma relação C/N maior e lignina/N acarretando uma decomposição mais lenta do resíduo e favorecendo o aumento dos teores de C ligados à argila e silte por meio da formação de complexos organo-minerais (Gazolla et al., 2015).

Embora os indicadores biológicos (SOC, CBM e BG) apresentem valores elevados no PA (Tabela 1), não foram observadas diferenças entre os sistemas nas camadas de solo avaliadas. Esse padrão pode estar relacionado à uniformidade no manejo da pastagem e à estabilidade proporcionada por esse sistema, o que favorece

a manutenção do aporte de C ao longo do perfil, mesmo com o acúmulo ocorrendo de forma lenta, como já apontado por Gazolla et al. (2015).

A atividade da β -glucosidase (BG) foi influenciada entre os usos do solo, especialmente nas camadas superficiais (Tabela 1), com destaque para o sistema PA, que apresentou os maiores valores médios (67,00; 18,02; 11,61 e 11,82) respectivamente para cada profundidade. A BG é uma enzima que desempenha papel fundamental no ciclo do C, atuando na degradação de polissacarídeos como a celulose. Sua atividade é sensível ao tipo de manejo adotado, sendo geralmente favorecida por práticas conservacionistas, como o plantio direto e o manejo adequado da cobertura vegetal (Turner et al., 2002; De Almeida et al., 2015). A elevada atividade da BG observada na PA pode ser atribuída à maior estabilidade estrutural do solo, ao acúmulo de resíduos orgânicos e ao favorecimento da biomassa microbiana proporcionados pela ausência de revolvimento. A redução da intensidade de preparo do solo aumenta a disponibilidade de substratos e diminui a perturbação ambiental, resultando em maiores níveis de atividade enzimática (Adetunji et al., 2017).

Indicador físico do solo

A Ds é um indicador importante do estado de conservação do solo, especialmente em relação à sua influência na estrutura do solo, na infiltração e retenção de água, desenvolvimento das raízes, trocas gasosas e processos de erosão. As curvas de pontuação da SMAF para a Ds seguem um modelo sigmoide inverso (“menos é melhor”) e consideram fatores como a textura e as classes mineralógicas do solo (Andrews et al., 2004). No entanto, os usos do solo não influenciaram a Ds nas quatro profundidades avaliadas, tanto nos valores de Ds quanto nos scores atribuídos pelo SMAF (Tabela 1).

Embora não tenha sido observado diferenças entre os tratamentos, o uso de gramíneas perenes em sistemas de ILP, como as *Urochloa*, seja em consórcio, sucessão ou rotação com culturas anuais, tem sido apontado como estratégia para reduzir a degradação do solo devido aos efeitos positivos dessas gramíneas nos atributos físicos do solo (Oliveira et al., 2024). O extenso sistema radicular dessas gramíneas forma uma rede complexa de poros, permitindo a exploração de um volume de solo maior em comparação com as culturas anuais, o que favorece os mecanismos de proteção física do carbono no solo (Tenelli et al., 2025).

5.2. Índice geral de saúde do solo na camada 0–30 cm

O ISS não diferiu estatisticamente entre os sistemas agrícolas avaliados neste estudo (Figura 4a). Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito compensatório entre os diferentes indicadores de qualidade do solo. Conforme mostra a Figura 4b, o sistema SC obteve scores relativamente altos no componente químico, enquanto os sistemas ILP e PA apresentaram melhores desempenhos nos componentes biológico e físico. Como o ISS representa uma média ponderada entre os três componentes (químico, físico e biológico), esses contrastes internos podem ter nivelado os valores finais entre os sistemas. Além disso, é possível que o tempo de adoção dos manejos (11 anos cada) ainda não tenha sido suficiente para causar diferenças estatísticas no índice geral, principalmente quando se considera a complexidade e a dinâmica dos atributos do solo. Estudos de longo prazo (20 anos) têm mostrado que alterações mais expressivas na saúde do solo, especialmente quando avaliadas por índices integrados como o SMAF, tendem a se consolidar apenas após períodos mais extensos de manejo (Mendes et al., 2021; Matos et al., 2022; Lima et al., 2024).

As variações entre os sistemas agrícolas podem estar relacionadas ao tempo de cobertura do solo. Por exemplo, no experimento a pastagem manejada (PA) manteve *Urochloa* durante todo o período de cultivo, enquanto o sistema ILP, organizado em uma rotação de quatro anos, contou com aproximadamente três anos de presença contínua da gramínea (consórcio com milho no segundo ano, seguido por dois anos apenas de pastagem), ao passo que a sucessão de culturas (SC) não incluiu fase com capim. Essa maior duração de cobertura por gramíneas perenes em ILP e PA provavelmente contribuiu para os maiores valores do componente biológico em comparação ao SC (Figura 5b), em função do aporte acumulado de fitomassa e raízes ao longo do tempo. Esse efeito é potencializado quando essas práticas são associadas ao manejo conservacionista, como o plantio direto, a rotação de culturas e a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo (Pillon et al., 2020). Além disso, a deposição de fezes e urina pelos animais nos sistemas com pastejo pode atuar como fonte natural de nutrientes, estimulando a atividade microbiana do solo e, conseqüentemente, influenciando positivamente os indicadores biológicos, especialmente no sistema PA, que apresentou diferença significativa em relação ao SC (Figura 5b) (Kao et al., 2024).

5.3. Implicações metodológicas para o manejo do solo

A análise dos índices de saúde do solo obtidos por meio do SMAF demonstrou que os atributos biológicos e químicos apresentaram maior sensibilidade às variações no uso do solo, quando comparados ao atributo físico para os sistemas avaliados (Figura 4). A pontuação do componente biológico foi ligeiramente superior nos sistemas ILP e PA, provavelmente devido à presença contínua de gramíneas, que favorecem a atividade microbiana e o acúmulo de carbono. Tais observações corroboram a literatura, que destaca os indicadores biológicos e químicos como mais responsivos às mudanças de manejo do solo (Cardoso et al., 2013), sendo, portanto, essenciais para a avaliação da sustentabilidade dos agroecossistemas.

Estudos com períodos ainda mais extensos podem contribuir para aprofundar a compreensão dos efeitos dos diferentes sistemas agrícolas sobre os atributos do solo. Embora a adaptação dos algoritmos do SMAF para camadas mais profundas (>15 cm) exija cautela, conforme apontado por Cherubin et al. (2016) devido ao seu desenvolvimento original para camadas superficiais. Apesar disso, a metodologia demonstrou-se eficaz para discriminar efeitos do manejo na camada 0-30 cm e constitui estratégia valiosa para orientar práticas agrícolas sustentáveis e a conservação dos recursos naturais.

Embora o componente físico da saúde do solo tenha sido representado unicamente pela densidade do solo, os resultados obtidos foram consistentes e permitiram identificar padrões relevantes relacionados ao uso e manejo do solo. A Ds se manteve estável ao longo do perfil de 0–30 cm e entre os diferentes sistemas agrícolas, sem diferenças estatísticas significativas (Tabela 1), sendo suficiente para compor o diagnóstico integrado no contexto do Índice de saúde do solo (Figura 4). Conforme ressaltado por Pulido Moncada et al. (2014), a densidade do solo, apesar de simples, é um indicador funcional importante quando combinado com outras dimensões da saúde do solo, sendo útil para detectar alterações provocadas pelo manejo ao longo do tempo.

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo confirmaram parcialmente a hipótese de que o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) apresenta melhores condições para a manutenção da saúde do solo em comparação à sucessão de culturas (SC), enquanto

se equipara à pastagem manejada (PA). Embora o índice geral de saúde do solo (ISS) não tenha apresentado diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas, PA e ILP exibiram desempenho superior no componente biológico, com maiores scores que SC, sem diferenças nos componentes químico e físico.

A pastagem bem manejada e a integração lavoura-pecuária melhoraram a saúde do solo e os indicadores biológicos foram mais sensíveis às diferenças entre os sistemas do que os indicadores químicos e físicos, associado ao maior aporte de fitomassa e à estabilidade da cobertura vegetal promovida pela presença de gramíneas perenes, como a *Urochloa*, que favorecem o acúmulo de carbono no solo, o carbono da biomassa microbiana e a atividade da β -glucosidade. Nas camadas 0-5 e 0-30 cm, a pastagem manejada e a integração lavoura-pecuária melhoraram a qualidade biológica do solo comparado à sucessão de culturas, enquanto nas camadas 10-20 e 20-30 cm a qualidade biológica do solo foi melhorada pela pastagem em relação à sucessão de culturas. O ISS geral mostrou melhor saúde do solo promovida pela pastagem e integração lavoura-pecuária nas camadas de 10-20 e 20-30 cm em comparação a sucessão de culturas. Essas evidências reforçam a importância da adoção de ferramentas integrativas, como o SMAF, que possibilitam avaliar a saúde do solo de forma multidimensional, considerando indicadores químicos, biológicos e físicos e suas interações ao longo do tempo.

Para futuras pesquisas, sugere-se avaliar os impactos econômicos dos diferentes sistemas agrícolas, considerando os custos e benefícios ambientais. Estudos de longo prazo também são necessários para analisar a dinâmica da saúde do solo em diferentes escalas de tempo e prever os efeitos das mudanças climáticas nos serviços ecossistêmicos.

REFERENCIAS

- ADETUNJI, Adewole T.; LEWU, Francis B.; NCUBE, Bongani. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794-807, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000300018>.
- ADHIKARI, Kabindra; HARTEMINK, Alfred E. Linking soils to ecosystem services—A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101-111, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES RIBEIRO, Naiane Antunes; MATOS, Aline Marchetti Silva; MODESTO, Viviane Cristina; JÚNIOR, Nelson Câmara De Souza; GIRARDI, Vitória Almeida Moreira; MENDES, Iêda De Carvalho; ANDREOTTI, Marcelo. Soil Bioindicators and Crop Productivity Affected by Legacy Phosphate Fertilization and Azospirillum brasilense Inoculation in No-Till Systems. **Applied Sciences**, v. 15, n. 13, p. 7146, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15137146>. Acesso em: 6 nov. 2025.

AMORIM, Helen CS; ASHWORTH, Amanda J.; DRESCHER, Gerson L.; SINGH, Mohkam; NUNES, Marcio R. Transferability of soil management assessment framework indices to detect best soil management strategies in tropical agroecosystems. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 10, n. 1, p. e70013, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ael2.70013>.

ANDREWS, Susan S.; KARLEN, Douglas L.; CAMBARDELLA, Cynthia A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.

ANNABI, Mohamed; RACLOT, Damien; BAHRI, Haithem; BAILLY, Jean Stéphane; GOMEZ, Cécile; LE BISSONNAIS, Yves. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. **Catena**, v. 153, p. 157-167, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.010>. Acesso em: 14 nov. 2025.

B. van RAIJ. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **IAC**. 2001.

BAI, Xuejuan; GUO, Zehui; HUANG, Yimei; AN, Shaoshan. Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process. **Catena**, v. 191, p. 104575, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104575>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BARCELLOS, Milena; MOTTA, Antonio Carlos Vargas; PAULETTI, Volnei; DA SILVA, José Carlos Peixoto Modesto; BARBOSA, Julierme Zimmer. Atributos químicos de Latossolo sob plantio direto adubado com esterco de bovinos e fertilizantes minerais. **Comunicata Scientiae**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 263-273, 2015. Disponível em: <https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/527>. Acesso em: 1 jun. 2026.

BEILLOUIN, Damien; BEN-ARI, Tamara; MALÉZIEUX, Eric; SEUFERT, Verena; MAKOWSKI, David. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. **Global change biology**, v. 27, n. 19, p. 4697-4710, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>. Acesso em: 9 out. 2025.

BERMEO, Juan Pablo Chavarro; HINCAPIE, Karen Lizeth Polania; CHERUBIN, Maurício Roberto; MOREA, Fausto Andres Ortiz; OLAYA, Adriana Marcela Silva.

Evaluating soil quality in silvopastoral systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in the Colombian Amazon. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. e20217966, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/88903>.

BIELUCZYK, Wanderlei et al. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 371, p. 114368, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. **Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 363-375, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>.

BOCALETI, Luiz Henrique dos Reis; GASPAROTTO, Francielli; PARIZ, Sabrina; FILHO, Edison Schmidt; PACCOLA, Edneia Aparecida de Souza. Sustentabilidade agrícola e saúde do solo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1–13, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0001. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5607>. Acesso em: 28 ago. 2025.

BONFANTE, Antonello; BASILE, Angelo; BOUMA, Johan. Targeting the soil quality and soil health concepts when aiming for the United Nations Sustainable Development Goals and the EU Green Deal. **Soil**, v. 6, n. 2, p. 453-466, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/soil-6-453-2020>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BRANDT, Eduardo André; SOUZA, Luiz Carlos Ferreira de; VITORINO, Antonio Carlos Tadeu; MARCHETTI, Marlene Estevão. Soybean agronomic performance as a function of crop succession in no tillage system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 869-874, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000500007>.

Cantarella, H. et al. Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: **Instituto Agrônomo de Campinas (IAC)**, 2022.

CARVALHO, João Luis Nunes; AVANZI, Junior Cesar; SILVA, Marx Leandro Naves; MELLO, Carlos Rogério De; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277-290, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>.

CERECETTO, Victoria; LEONI, Carolina; JURBURG, Stephanie D.; KAMPOURIS, Ioannis D.; SMALLA, Kornelia; BABIN, Doreen. Pasture-crop rotations modulate the soil and rhizosphere microbiota and preserve soil structure supporting oat cultivation in the Pampa biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 195, p. 109451, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109451>.

CHERUBIN, Maurício R. et al. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 163, p. 113315, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>.

CHERUBIN, Maurício R.; KARLEN, Douglas L.; FRANCO, André L. C.; CERRI, Carlos E. P.; TORMENA, Cássio A.; CERRI, Carlos C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil**

Science Society of America Journal, v. 80, n. 1, p. 215-226, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>.

CHERUBIN, Maurício Roberto et al. Long-term effects of crop diversification on soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystems. **Journal of Environmental Management**, v. 392, p. 126845, 2025c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126845>. Acesso em: 14 ago. 2025.

CHERUBIN, Maurício Roberto; EITELWEIN, Mateus Tonini; FABBRIS, Cristiano; WEIRICH, Sidinei Wolnei; SILVA, Rodrigo Ferreira Da; SILVA, Vanderlei Rodrigues Da; BASSO, Claudir José. Physical, chemical, and biological quality in an oxisol under different tillage and fertilizer sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 615-625, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140462>.

CHERUBIN, Maurício Roberto; JUNIOR, Carlos Roberto Pinheiro; SOUZA, Lucas Nogueira; CANISARES, Lucas Pecci; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. Exploring soil health research in Brazil: A critical analysis of national challenges, opportunities, and priorities. **Land Use Policy**, v. 157, p. 107677, 2025b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107677>. Acesso em: 1 set. 2025.

CHERUBIN, Maurício Roberto; JUNIOR, Carlos Roberto Pinheiro; SOUZA, Lucas Freitas Nogueira; CANISARES, Lucas Pecci; FERREIRA, Tiago Osório; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. Global blind spots in soil health research overlap with environmental vulnerability hotspots. **Communications Earth & Environment**, v. 6, n. 1, p. 651, 2025a. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02663-w>. Acesso em: 14 ago. 2025.

CHERUBIN, Maurício Roberto; SANTI, Antônio Luis; BASSO, Claudir José; EITELWEIN, Mateus Tonini; VIAN, André Luis. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 196-210, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301554034_CARACTERIZACAO_E ESTRATEGIAS_DE_MANEJO_DA_VARIABILIDADE_ESPACIAL_DOS_ATRIBUTOS_QUIMICOS_DO_SOLO_UTILIZANDO_A_ANALISE_DOS_COMPONENTES_PRINCIPAIS.

CHODEN, Tshering; LINDHARDT, Magnus Kamau Katana; HOFMEIJER, Merel; EVERS, Jochem B.; GHALEY, Bhim Bahadur; APELDOORN, Dirk F. van. Tree-crop combinations and their variable effects on agroecosystem services: A systematic review and meta-analysis of temperate silvoarable agroforestry in the Northern Hemisphere. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 396, p. 109963, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109963>. Acesso em: 5 out. 2025.

CONUS, Lenita Aparecida. **Atributos físicos do solo em função do manejo e sucessão de culturas em ambiente amazônico**. 2014. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2014.

DA LUZ, Felipe Bonini; GONZAGA, Leandro Carolino; CHERUBIN, Mauricio Roberto; CASTIONI, Guilherme Adalberto Ferreira; CARVALHO, João Luis Nunes. Soil health

impact of long-term sugarcane vinasse recycling. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 18, n. 6, p. 2064-2077, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.2688>.

DA LUZ, Felipe Bonini; SILVA, Vanderlei Rodrigues Da; MALLMANN, Fábio Joel Kochem; PIRES, Carlos Augusto Bonini; DEBIASI, Henrique; FRANCHINI, Julio César; CHERUBIN, Mauricio Roberto. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 281, p. 100-110, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>.

DA PAIXÃO ALVES, Vanessa; MARTIN, Débora Gonzaga; GIANNINI, Tereza Cristina; JUNIOR, Renato Silva; GUIMARÃES, José Tasso Felix; MOIA, Gabriel Costa Maciel; SILVA, Rosa de Nazaré Paes da. The cocoa bioeconomy in the eastern Amazon: An integrated analysis of production, environmental degradation perceptions and socioeconomic factors among farmers. **Agricultural Systems**, v. 229, p. 104428, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104428>. Acesso em: 22 set. 2025.

DE ALMEIDA, R. Ferraz; NAVES, Emmanuel Rezende; DA MOTA, R. Pinheiro. Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. **Glob. J. Agric. Res. Rev**, v. 3, n. 2, p. 146-450, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/294584105_Soil_quality_Enzymatic_activity_of_soil_b-glucosidase.

DE ARRUDA SOUZA, Celso; JUNIOR, Ernandes Sobreira Oliveira; DE SOUZA HACON, Sandra. Serviços ecossistêmicos da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 17, n. 10, p. 178-198, 2024.

DE MOURA, Emanuel G.; SOUSA, Rafael M. De.; CAMPOS, Lorena S.; CARDOSO-SILVA, Anágila J.; MOONEY, Sacha J.; AGUIAR, Alana Das C.F. Could more efficient utilization of ecosystem services improve soil quality indicators to allow sustainable intensification of Amazonian family farming?. **Ecological Indicators**, v. 127, p. 107723, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107723>.

DE OLIVEIRA, Daniele Costa; MAIA, Stoécio Malta Ferreira; FREITAS, Rita de Cássia Alves; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 87, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01945-9>.

DE OLIVEIRA, Victor Pereira; MARTINS, Walmer Bruno Rocha; RODRIGUES, Julia Isabella De Matos; SILVA, Arystides Resende; LOPES, José Do Carmo Alves; SCHWARTZ, Gustavo. Pit volume, soil cover and Eucalyptus forestry residues determine plant growth in restoring areas after gravel mining in eastern Amazon, Brazil. **New Forests**, v. 55, n. 2, p. 197-211, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09970-0>.

DE SOUSA, Daiane Conceição; ROSA, Jaqueline Dalla; MEDEIROS, Joao Carlos; BOECHAT, Cacio Luiz; NOBREGA, Rafaela Simão Abrahão; DE SOUZA, Henrique Antunes; SAGRILO, Edvaldo. Microbial indicators of soil quality and soybean yield in

agricultural production system using cover crops under no-tillage. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n. 6, p. 507-513, 2023. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.267781709169034#>.

DONG, Zhenfen; XU, Tengting; YANG, Yuanyu; WANG, Jue; JIANG, Tongtong; MEN, Yuheng. Research on the sustainable development of agricultural ecosystems based on the population and ecological interaction network model. **Ecological Modelling**, v. 511, p. 111383, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111383>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ELLERT, Benjamin H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>.

ELLIOTT, ET[†]. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil science society of America journal**, v. 50, n. 3, p. 627-633, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>.

FAUSAK, Lewis K.; BRIDSON, Noa; OSORIO, Fernanda Diaz, JASSAL, Rachhpal S.; LAVKULICH, Les M. Soil health—a perspective. **Frontiers in Soil Science**, v. 4, p. 1462428, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>. Acesso em: 14 nov. 2025.

GAZOLLA, Paulo Roberto; GUARESCHI, Roni Fernandes; PERIN, Adriano; PEREIRA, Marcos Gervasio; ROSSI, Celeste Queiroz. Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p693>.

GOERGEN, Nádia. **Qualidade do solo em áreas de expansão da cultura soja no Rio Grande do Sul**. 2020. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2020.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. 2.1 Bulk density and linear extensibility. **Methods of soil analysis: Part 4 physical methods**, v. 5, p. 201-228, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c9>.

GUO, Xingyu; WANG, Shulan; WANG, Hao; AHMAD, Naeem; WANG, Xiaoli; LI, Jun; WANG, Rui. Integrated assessment reveals plowing/no-tillage rotation as the trade-off considering crop yield and environmental performance in the Loess Plateau. **Agricultural Systems**, v. 231, p. 104546, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104546>. Acesso em: 4 nov. 2025.

INACIO, Karini Aparecida Matos; FONSECA, Aureo Henrique Hubinger; TROVATO, Gustavo Henrique Chaves Matos; OLIVEIRA, Alexandre Alonso; QUEIROZ, Rianni Paula; SANTOS, Márcio Lustosa; MAUAD, Munir; SANTOS, Elcio Ferreira. Soil organic matter and enzyme activity in tropical sandy soils under integrated and conventional land uses. **Soil Science Society of America Journal**, v. 89, n. 5, p. e70151, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.70151>. Acesso em: 10 nov. 2025.

JAIN, Harshita; DHUPPER, Renu. Holistic strategies for sustainable buildings and their impacts on soil and environmental health. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 11, n. 1, p. 10, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00688-4>. Acesso em: 5 out. 2025.

KAO, Pei-Tzu; MCGRATH, Steve P.; BUSS, Heather L.; DARCH, Tegan; WARREN, Helen E.; MCAULIFFE, Graham A.; CARDENAS, Laura; BLACKWELL, Martin; LEE, Michael R. F. The role of ruminant urine and faeces in the recycling of nutrients by forages. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 16007, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66648-z>.

KUNDU, Pritha; BISWAS, Saikat. Securing soil health as the foundation for strengthening planetary health. **Soil Security**, p. 100205, 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100205>. Acesso em: 6 nov. 2025.

LEHMANN, Johannes; BOSSIO, Deborah A.; KNABNER, Ingrid Kögel; RILLIG, Matthias C. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544-553, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>. Acesso em: 5 out. 2025.

LIMA, Antonio Yan Viana et al. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process. **Applied Soil Ecology**, v. 193, p. 105107, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105107>.

LIMA, Julião Soares de Souza; SILVA, Samuel de Assis; SILVA, José Marcilio da. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 16-23, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100003>.

LIU, Qinghua; SUN, Xiao; WU, Wengbin; LIU, Zhenhuan; FANG, Guangji; YANG, Peng. Agroecosystem services: A review of concepts, indicators, assessment methods and future research perspectives. **Ecological Indicators**, v. 142, p. 109218, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109218>. Acesso em: 5 out. 2025.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil entre 1985 e 2023. 2025. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>.

MARÓSTICA, Maria Emilia Moreira. **Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de produção no Cerrado**. 2023. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023. doi:10.11606/D.11.2023.tde-01112023-160015. Acesso em: 28 ago. 2025.

MATOS, Priscila Silva; CHERUBIN, Maurício Roberto; DAMIAN, Júnior Melo; ROCHA, Fernando Igne; PEREIRA, Marcos Gervasio; ZONTA, Everaldo. Short-term effects of agroforestry systems on soil health in Southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 5, p. 897-908, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00749-4>.

MELO, Vander Freitas; ORRUTÉA, Alessandro Góis; MOTTA, Antônio Carlos Varga, TESTONI, Samara Alves. Land use and changes in soil morphology and physical-

chemical properties in southern amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0170034, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20170034>.

MENDES, Ieda Carvalho; SOUSA, Djalma Martinhão Gomes; DANTAS, Ozanival Dario; LOPES, André Alves Castro; JUNIOR, Fábio Bueno Reis; OLIVEIRA, Maria Ines; CHAER, Guilherme Montandon. Soil quality and grain yield: A win-win combination in clayey tropical Oxisols. **Geoderma**, v. 388, p. 114880, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880>.

MENDONÇA, Fernanda Cristina Aguiar; FERREIRA, Robério Anastácio; TORRES, Maria Fernanda Oliveira; SILVA, Airon José da; PINHEIRO, André César; MANN, Renata Silva. From degradation to restoration: Soil, biotic changes, and monitoring models in the Atlantic Forest over 17 years. **Ecological Engineering**, v. 223, p. 107811, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107811>. Acesso em: 10 nov. 2025.

MICHELON, Cleudson José, JUNGES, Emanuele; CASALI, Carlos Alberto; PELLEGRINI, João Batista Rossetto; NETO, Lethícia Rosa; OLIVEIRA, Zanandra Boff de; OLIVEIRA, Marília Boff de. Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 2, p. 230-239, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711812019230>.

MITSUTA, Akari; LOURENÇO, Késia Silva; OLIVEIRA, Bruna Gonçalves de; COSTA, Ohana Yonara de Assis; CANTARELLA, Heitor; KURAMAE, Eiko Eurya. Soil pH determines the shift of key microbial energy metabolic pathways associated with soil nutrient cycle. **Applied Soil Ecology**, v. 208, p. 105992, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105992>.

MONCADA, Mansonia Pulido; GABRIELS, Donald; CORNELIS, Wim M. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. **Geoderma**, v. 235, p. 271-278, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.014>.

MONTEIRO, Alyce; MENDES, Luciano Barreto; FANCHONE, Audrey; MORGAVI, Diego Pablo; PEDREIRA, Bruno C.; MAGALHÃES, Ciro A.S.; ABDALLA, Adibe Luiz; EUGÈNE, Maguy A. Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. **Science of The Total Environment**, v. 906, p. 167396, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167396>.

NASCIMENTO, Alexandre Ferreira do; FURQUIM, Sheila Aparecida Correia; COUTO, Eduardo Guimarães; BEIRIGO, Raphael Moreira; JÚNIOR, Jairo Calderari de Oliveira; CAMARGO, Plínio Barbosa de; TORRADO, Pablo Vidal. Genesis of textural contrasts in subsurface soil horizons in the Northern Pantanal-Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1113-1127, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500001>.

OLIBONE, Dácio.; ROSOLEM, Ciro Antonio. Adubação fosfatada e formas de fósforo em um Oxisol sob plantio direto. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 4, p. 465–471, ago. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000400014>.

OLIVEIRA, Dener M.S.; SANTOS, Rafael S.; CHIZZOTTI, Fernanda H.M.; BRETAS, Igor L.; FRANCO, André L.C.; LIMA, Renato P.; FREITAS, Diego A.F.; CHERUBIN, Maurício Roberto; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. **Geoderma Regional**, v. 37, p. e00796, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>.

PEREIRA UCHÔA, Sandra Cátia; DE SOUZA FARAGE, Sasha; ARCANJO ALVES, José Maria; DE LIMA MATOS, Carlos Henrique; DO NASCIMENTO TAVARES, Ingridy; FERREIRA MELO, Valdinar. IMPACTS OF REPLACING THE AMAZON RAINFOREST WITH PASTURE ON SOIL PROPERTIES. **REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2025. DOI: 10.32404/rean.v12i1.8879. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/agrineo/article/view/8879>.

PILLON, C. N.; DE ÁVILA, M. R.; DE ÁVILA, MARIANA ROCKENBACH. Manejo conservacionista e qualidade do solo. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-1129525>.

PRADO, Laís Guerra et al. Impact of different *Brachiaria ruziziensis* management practices in a crop-livestock integration system on soil health, soybean physiology, and yields. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 393, p. 109808, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109808>. Acesso em: 4 nov. 2025.

REZENDE, Alexandre Garcia; SOUZA, Italo Rômulo Mendes de; FONSECA, Camila Moraes; DELMOD, Josué Gomes; SILVA, Erika Andressa; COSTA, Katia Aparecida de Pinho; SEVERIANO, Eduardo Da Costa. Compaction modeling of contrasting brazilian tropical soils: Implications of pseudosilt and reference values in proposing pedotransfer functions. **Geoderma**, v. 459, p. 117395, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117395>. Acesso em: 22 set. 2025.

RODRÍGUEZ-LEÓN, Carlos H.; PEÑA-VENEGAS, Clara P.; STERLING, Armando; CASTRO, Daniel; MAHECHA-VIRGUEZ, Lizeth K.; VIRGUEZ-DIAZ, Yeny R. SILVA-OLAYA, Adriana M. Soil quality restoration during the natural succession of abandoned cattle pastures in deforested landscapes in the Colombian Amazon. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2484, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122484>.

RUIZ, Francisco; CHERUBIN, Maurício Roberto; FERREIRA, Tiago Osório. Soil quality assessment of constructed Technosols: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, v. 276, p. 111344, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111344>.

SANTOS, H.G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa, ed. Embrapa Solos. 2018

SANTOS, V. A. C. dos; BEHLING NETO, A.; ALMEIDA, R. G. de; MACEDO, M. C. M. Biomassa da parte aérea e do sistema radicular do capim-piatã em sistemas integrados. In: SISTEMAS AGROFLORESTAIS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 10 ANOS DE PESQUISA, 2013, Campo Grande. Anais... Campo

Grande: SAF's: Embrapa Gado de Corte. 2013 Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/977037>.

SARKAR, Deepranjan; KAR, Saswat Kumar; CHATTOPADHYAY, Arghya; Shikha; RAKSHIT, Amitava; TRIPATHI, Vinod Kumar; DUBEY, Pradeep Kumar; ABHILASH, P.C. Low input sustainable agriculture: A viable climate-smart option for boosting food production in a warming world. **Ecological Indicators**, v. 115, p. 106412, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106412>. Acesso em: 6 nov. 2025.

SILVA, José Cleydson Ferreira et al. Challenges and Opportunities for New Frontiers and Technologies to Guarantee Food Production. **Sustainability**, v. 17, n. 9, p. 3792, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17093792>. Acesso em: 5 nov. 2025.

SILVA-OLAYA, Adriana M.; MOREA, Fausto A. Ortiz; CETINA, Gina P. España; MONTES, Andrés Olaya; GRADOS, Daniel; GASPARATOS, Alexandros; CHERUBIN, Maurício Roberto. Composite index for soil-related ecosystem services assessment: Insights from rainforest-pasture transitions in the Colombian Amazon. **Ecosystem Services**, v. 57, p. 101463, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101463>. Acesso em: 2 fev. 2025.

SIQUEIRA NETO, Marcos; PAIVA VENZKE FILHO, Solismar de; PICCOLO, Marisa de Cássia; PELLEGRINO CERRI, Carlos Eduardo; CERRI, Carlos Clemente. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR): I-Sequestro de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1013-1022, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400025>.

SIQUEIRA, Marcos Gomes de; FIORELLI, Elaine Cosma; SANTOS, Weverton Peroni; MACHADO, Caio Bastos; SANTOS, Weliton Peroni; VIEIRA, Aline Silva; SOUZA, Sirlene Pereira de; SCHLINDWEIN, Jairo André. BIOMASSA MICROBIANA E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO SOB DIFERENTES MANEJOS E SUCESSÃO DE CULTURAS. In: **EXTENSÃO RURAL: PRÁTICAS E PESQUISAS PARA O FORTALECIMENTO DA AGRICULTURA FAMILIAR-VOLUME 2**. Editora Científica Digital, 2021. p. 126-138.

SIX, Johan; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and soil**, v. 241, n. 2, p. 155-176, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

SOARES, Deyvison de Asevedo et al. Accumulated carbon fractions in tropical sandy soils and their effects on fertility and grain yield in an integrated crop–livestock system. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13829, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151813829>.

SOIL SURVEY STAFF. Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service. 2022.

SOUZA, Victória Santos; CANISARES, Lucas Pecci; SCHIEBELBEIN, Bruna Emanuele; SANTOS, Darliane de Castro; MENILLO, Rafael Braghieri; JUNIOR, C. Roberto Pinheiro; CHERUBIN, Maurício Roberto. Cover crops enhance soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystem. **Field Crops Research**, v. 322, p.

109755, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109755>. Acesso em: 18 jun. 2025.

STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 1, p. 107-119, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>.

TEAM, R. C. A language and environment for statistical computing. Foundation for statistical computing [em linha]. 2020.

TENELLI, S.; NASCIMENTO, A.F.; GABETTO, F.D.; BORDONAL, R. O.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N. Well-managed grass is a key strategy for carbon storage and stabilization in anthropized Amazon soils. **Journal of Environmental Management**, v. 373, p. 123742, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123742>.

TURMEL, Marie-Soleil; SPERATTI, Alicia; BAUDRON, Frédéric; VERHULST, Nele; GOVAERTS, Bram. Crop residue management and soil health: A systems analysis. **Agricultural Systems**, v. 134, p. 6-16, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>. Acesso em: 14 nov. 2025.

TURNER, Benjamin L.; HOPKINS, David W.; HAYGARTH, Philip M.; OSTLE, Nick J. β -Glucosidase activity in pasture soils. **Applied Soil Ecology**, v. 20, n. 2, p. 157-162, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00020-3).

VAN DER SANDE, Masha T. et al. Soil resistance and recovery during neotropical forest succession. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 378, n. 1867, p. 20210074, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0074>.

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

VIANA, João Herbert M.; SPERA, Tulio Silvio; MAGALHAES, Ciro Augusto S.; CALDERANO, Sebastião Barreiros. **Caracterização dos solos do sítio experimental dos ensaios do Projeto Safrinha em Sinop-MT**. 2015. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1021201>.

VILLAR, Maria Luiza Perez. **Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação**. EMPAER-MT, 2007.

WIENHOLD, Brian J.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; STOTT, D. E. Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable agriculture and food systems**, v. 24, n. 4, p. 260-266, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1742170509990093>.

YANG, Yiling; XIONG, Kangning; XIAO, Jie. A review of agroforestry biodiversity-driven provision of ecosystem services and implications for karst desertification control. **Ecosystem Services**, v. 67, p. 101634, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101634>. Acesso em: 9 out. 2025.

ZARATE-SALAZAR, Jhonatan Rafael; SOUZA, Renato Francisco da Silva; BEZERRA, Francielel Arruda; SILVA, Douglas Marcelo Pinheiro da; CAMPOS, Milton Cesar Costa; CUNHA, José Maurício da; PARRA, Jeison Andrey Sanchez; SOUZA, Zigomar Menezes de. First approximation of soil quality critical limits in land use systems in the Brazilian Amazon. **Catena**, v. 247, p. 108476, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108476>. Acesso em: 5 out. 2025.

APÊNDICE

Tabela 1A: Análises químicas do solo inicialmente.

Horizonte	Profundidade (cm)	pH (1:2,5) água	Ca ²⁺ (cmol _c /kg)	Mg ²⁺ (cmol _c /kg)	K ⁺ (cmol _c /kg)	Al ³⁺ (cmol _c /kg)	H ⁺ (cmol _c /kg)	Valor T (cmol _c /kg)	Valor V (sat. por bases) %	P assimilável (mg/kg)
Ap	0-18	5,2	1,76	0,3	88	0,09	5,8	8,1	28	28
BA	18-45	4,8	0,17	0	8	0,37	6,0	6,2	3	2

Fonte: Adaptado de Viana et al. (2015).

Tabela 2A: Taxas de calcário e fertilizante por elemento químico aplicados no experimento de campo ao longo de onze anos.

Ciclo de cultivo		N	P	K	Calagem
2011/2012	Soja	0 *	70 *	70 *	0 *
	Milho	12 + 135 *	90 *	48 *	0 *
	Pasto	0 *	0 *	0 *	0 *
2012/2013	Soja	0 *	70 *	70 *	0 *
	Milho	12 + 135 *	90 *	48 *	0 *
	Pasto	0 *	0 *	0 *	0 *
2013/2014	Soja	0 *	70 *	70 *	1500 *
	Milho	12 + 135 *	90 *	48 *	-
	Pasto	0 *	0 *	0 *	-
2014/2015	Soja	0 *	80 *	80 *	1000 *
	Milho	12 + 135 *	90 *	48 *	-
	Pasto	0 *	0 *	0 *	-
2015/2016	Soja	8 *	80 *	80 *	1000 *
	Milho	14 + 67.5	105 *	56 *	-
	Pasto	24.7 + 10	4.71 +	27.5 + 10	-
2016/2017	Soja	0 *	0 *	90 *	0 *
	Milho	14 + 67.5	105 *	56 *	0 *
	Pasto	10 + 10 *	6.28 *	10 + 10 *	0 *
2017/2018	Soja	0 *	0 *	100 *	0 *
	Milho	35 + 67.5	59.5 *	59.5 *	0 *
	Pasto	22.5 *	2.35 *	21 *	0 *
2018/2019	Soja	0 *	0 *	87.5 *	0 *
	Milho	20 + 90 *	50 *	50 + 50 *	0 *
	Pasto	22.5 + 10	3.93 *	21 + 10 *	0 *
2019/2020	Soja	0 *	62 *	62 *	1650 *
	Milho	30 + 24 +	80 + 64 *	80 + 64 *	-
	Pasto	0 *	0 *	0 *	-
2020/2021	Soja	0 *	80 *	80 *	0 *
	Milho	40 + 60 +	80 *	80 + 60 *	0 *
	Pasto	10 + 4 *	3.93 +	10 + 4 *	0 *
2021/2022	Soja	12.5 *	62.5 *	62.5 + 50	1700 *
	Milho	16 *	60 *	32 *	-
	Pasto	8 *	3.93 *	8 *	-

Os valores representam a entrada anual por elemento químico, com a aplicação de calagem em toda a área do experimento. As doses de fertilizantes são indicadas por * para kg ha⁻¹ e ** para g ha⁻¹. Somas diferentes (+) indicam que doses diferentes do mesmo elemento foram aplicadas no mesmo ano. As quantidades foram ajustadas para cada elemento químico a fim de garantir a disponibilidade ideal de nutrientes para as plantas e manter a fertilidade do solo durante todo o período do estudo.

Tabela 3A: Algoritmos e demonstrações lógicas utilizadas para interpretação dos indicadores.

Indicadores	Algoritmo de Pontuação	Parâmetros fixos	Fatores específicos do local
pH	$y = a * \exp((-pH - b)^2) / 2 * c^2)$	a = 1.0	b = optimum pH for crop c = f(range)
P	<i>IF P</i> $\leq \max(\text{for crop and method}), \text{THEN } y$ $= (a * b + c * P^d) / (b + P^d);$ <i>IF P</i> $> \max(\text{for slope and method}), \text{THEN } y$ $= a - b * \exp(-c * P^d),$ <i>ELSE y = 1</i>	Where to: $P \leq \max$ (a = 0,000000925; c = 1; d = 3,06), $P > \max$ (a = 1; b = 4,5; d = -2)	b = f(crop, TOC, texture, method); c = f(slope, TOC, texture, method)
K	$y = a(1 - e^{\wedge} - bK)$		texture class 3, 4, and 5 (a = 1,07449, b = - 0,02243) texture class 1 and 2 (a = 1,054133, b = - 0,00981)
SOC	$y = a / 1 + b * \exp - c * TOC$	a = 1 b = 50,1	c = f(OM class, texture, climate)

MBC	$y = a / 1 + b * \exp(-cMBC)$	a = 1 b = 40,748	c = f(OM class, texture, climate)
BD	$y = a - b * \exp(-c BD^d)$	a = 0,994	b, c, d = f(texture)