

Estoques de nitrogênio e carbono sob diferentes sistemas de uso e manejo de um latossolo amarelo no município de Paragominas

No-till system enhances soil carbon storage and ecosystem services in the Amazon region

Reservas de nitrógeno y carbono bajo diferentes sistemas de uso y manejo de un latosol amarillo en el municipio de Paragominas

DOI: 10.34188/bjaerv8n3-109

Submetido: 30-05-2025

Aprovado: 15-06-2025

Raimundo Cosme de Oliveira Junior

Eng. Agr., Pesquisador, Doutor em Geoquímica Ambiental
Embrapa Amazônia Oriental
Santarém, PA. Brasil

E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho

Eng. Agr., Pesquisador, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Amazônia Oriental
Belém, PA. Brasil

E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

Darlisson Bentes dos Santos

Eng. Agr., Mestre em Energia na Agricultura
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Santarém, PA. Brasil

E-mail: engenheirodb@hotmai.com

Daniel Rocha de Oliveira

Médico Veterinário, Mestre em Clínica e Reprodução Animal
Universidade Federal Fluminense
Santarém, PA. Brasil

E-mail: handvet@yahoo.com.br

Carlos Alberto Costa Veloso

Eng. Agr., Pesquisador, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Amazônia Oriental
Belém, PA. Brasil

E-mail: carlos.veloso@embrapa.br

Nagib Jorge Melem Junior

Eng. Agr., Doutor em Agronomia
Universidade Estadual de Londrina
Macapá, AP. Brasil

E-mail: nagib.melem@embrapa.br

RESUMO

A adoção de sistemas de manejo que preservem ou incrementem os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo é crucial para a sustentabilidade da agricultura na Amazônia. Este estudo teve como objetivo avaliar as alterações nos estoques de C e N e na densidade do solo (Ds) em diferentes sistemas de manejo no município de Paragominas, PA. Foram avaliados quatro sistemas: Vegetação Secundária (CAP - referência), Plantio Direto (PD), Plantio Convencional (PC) e Pastagem (PAST). Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm para determinação dos teores de C orgânico total (COT) e N total (NT), da Ds e posterior cálculo dos estoques (ECO e ENT). Os resultados demonstraram que os estoques de C e N na camada de 0-10 cm no PD foram estatisticamente equivalentes aos encontrados na CAP, e superiores aos do PC. A pastagem também se mostrou eficaz na acumulação de C. O PC apresentou os menores valores de ECO e ENT e a maior Ds, indicando degradação do solo. Conclui-se que o sistema de Plantio Direto é uma estratégia de manejo sustentável para a região, capaz de manter a qualidade do solo e os estoques de C e N em níveis similares aos de um ecossistema de referência, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para uma agropecuária mais sustentável na Amazônia.

Palavras-chave: matéria orgânica do solo, qualidade do solo, sistemas de manejo, sequestro de carbono, agricultura sustentável.

ABSTRACT

The adoption of management systems that preserve or increase soil carbon (C) and nitrogen (N) stocks is crucial for the sustainability of agriculture in the Amazon. This study aimed to evaluate changes in C and N stocks and soil density (Ds) in different management systems in the municipality of Paragominas, Pará state, Brazil. Four systems were evaluated: Secondary Vegetation (CAP - reference), No-Till (PD), Conventional Tillage (PC), and Pasture (PAST). Soil samples were collected at depths of 0-10 and 10-20 cm to determine the levels of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN), Ds, and subsequent calculation of stocks (ECS and ENS). The results showed that the C and N stocks in the 0-10 cm layer under PD were statistically equivalent to those found in the CAP and higher than those in the PC. Pasture was also effective in accumulating C. The PC system showed the lowest ECS and ENS values and the highest Ds, indicating soil degradation. It is concluded that the No-Till system is a sustainable management strategy for the region, capable of maintaining soil quality and C and N stocks at levels similar to a reference ecosystem, contributing to climate change mitigation and more sustainable agriculture in the Amazon.

Keywords: soil organic matter, soil quality, management systems, carbon sequestration, sustainable agriculture.

RESUMEN

La adopción de sistemas de gestión que preserven o aumenten las reservas de carbono (C) y nitrógeno (N) del suelo es fundamental para la sostenibilidad de la agricultura en la Amazonía. El objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en las reservas de C y N y en la densidad del suelo (Ds) en diferentes sistemas de gestión en el municipio de Paragominas, estado de Pará, Brasil. Se evaluaron cuatro sistemas: vegetación secundaria (CAP, referencia), labranza cero (PD), labranza convencional (PC) y pastizal (PAST). Se recogieron muestras de suelo a profundidades de 0-10 y 10-20 cm para determinar los niveles de carbono orgánico total (TOC) y nitrógeno total (TN), Ds, y el posterior cálculo de las reservas (ECS y ENS). Los resultados mostraron que las reservas de C y N en la capa de 0-10 cm bajo PD eran estadísticamente equivalentes a las encontradas en CAP y superiores a las de PC. El pastizal también fue eficaz en la acumulación de C. El sistema PC mostró los valores más bajos de ECS y ENS y los más altos de Ds, lo que indica la degradación del suelo. Se concluye que el sistema de labranza cero es una estrategia de gestión sostenible para la región, capaz de mantener la calidad del suelo y las reservas de C y N en niveles similares a los de un

ecossistema de referencia, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y a una agricultura más sostenible en la Amazonía.

Palabras clave: materia orgánica del suelo, calidad del suelo, sistemas de gestión, secuestro de carbono, agricultura sostenible.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como um dos principais produtores e exportadores agrícolas globais. Este crescimento, impulsionado pela incorporação de novas áreas e, principalmente, por avanços tecnológicos, coloca o país no centro do debate entre produção e sustentabilidade (Ferraz e Skorupa, 2017). Na Região Norte, o estado do Pará emerge como o principal produtor, onde a agropecuária é um pilar econômico, frequentemente associada a históricos pressões sobre os recursos naturais (Reis et al., 2024; Matos et al., 2016).

O município de Paragominas, no nordeste paraense, é um emblemático caso de transição econômica. De um passado recente marcado pela pecuária extensiva e exploração madeireira de baixa tecnologia, o município tem buscado se reposicionar por meio da adoção de sistemas integrados e de maior produtividade, respondendo a demandas mercadológicas internas e externas por sustentabilidade (Gardner et al., 2019).

A expansão e intensificação das atividades agropecuárias na Amazônia, se não manejadas adequadamente, podem levar à degradação dos solos. Esses solos, naturalmente ácidos e de baixa fertilidade, dependem criticamente da matéria orgânica para manter sua capacidade produtiva e integridade ecológica (Cherubin et al., 2016). A conversão de áreas de floresta ou pastagens degradadas para sistemas agrícolas provoca alterações significativas nos ciclos biogeoquímicos, podendo resultar em perdas expressivas de carbono e nitrogênio do solo para a atmosfera, intensificando o efeito estufa e esgotando a fertilidade a longo prazo (SÁ et al., 2017).

Apesar do reconhecimento geral desse problema, existe uma carência aguda de dados quantitativos em escala local que comparem a eficiência de diferentes sistemas de manejo adotados na região em preservar ou incrementar os estoques de C e N. Esta lacuna dificulta a tomada de decisão por parte de produtores e formuladores de políticas públicas que visam a intensificação sustentável da agropecuária paraense.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar o impacto de diferentes sistemas de manejo do solo nos estoques de carbono orgânico total e nitrogênio total em áreas do município de Paragominas, Pará. Especificamente, busca-se:

a) Quantificar os teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade do solo;

b) Comparar os estoques de COT e NT entre sistemas de manejo representativos da região, tais como: pastagem extensiva, sistema de plantio direto, sistema integrado Lavoura-Pecuária (iLP) e uma área de floresta nativa (referência);

c) Correlacionar os estoques de COT e NT com outros atributos indicadores da qualidade do solo, como densidade e textura.

Com base no estado da arte, formula-se a hipótese de que sistemas de manejo conservacionistas, caracterizados pelo menor revolvimento do solo e maior diversidade de espécies (como o plantio direto e o sistema iLP), possuem estoques de carbono orgânico total e nitrogênio total superiores e mais próximos aos da vegetação nativa quando comparados aos sistemas manejados de forma convencional, como a pastagem extensiva mal manejada. Presume-se que o maior aporte de resíduos culturais e a proteção física da matéria orgânica proporcionados por esses sistemas sejam os principais fatores responsáveis por essa diferença.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A avaliação da qualidade do solo depende da utilização de indicadores sensíveis e robustos, capazes de detectar mudanças em curto e médio prazos. Estes indicadores, classificados em físicos, químicos e biológicos, fornecem um diagnóstico integrado da saúde do solo (Bünemann et al., 2018). Entre os indicadores químicos, o Carbono Orgânico Total (COT) e o Nitrogênio Total (NT) são amplamente reconhecidos como centrais, por estarem diretamente ligados à fertilidade, à estruturação do solo e ao sequestro de carbono (Kwang et al., 2023).

Em sistemas tropicais, a dinâmica da MOS é acelerada devido às condições climáticas. Portanto, práticas de manejo que promovam a entrada constante de resíduos vegetais (como rotação de culturas e integração lavoura-pecuária-floresta - iLPF) são essenciais para manter ou elevar os teores de MOS (Adekiya et al., 2023). Estudos recentes têm demonstrado que sistemas de produção baseados em baixa perturbação do solo (plantio direto) e na diversificação de espécies são superiores em acumular C e N em comparação aos sistemas convencionais baseados em preparo intensivo do solo e monocultura (Corbeels et al., 2020).

Contudo, a resposta específica dos estoques de C e N é altamente dependente das condições edafoclimáticas locais, do histórico de uso da terra e do manejo adotado. Dessa forma, gerar dados específicos para a realidade de Paragominas é fundamental para validar e calibrar modelos de uso da terra e fornecer recomendações técnicas adequadas à região.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no município de Paragominas, localizado na mesorregião nordeste do estado do Pará (Figura 1). O clima da região é do tipo Am segundo Köppen, com precipitação média anual de 1.800 mm e temperatura média de 26 °C (Giuliatti et al., 2019). Os solos das áreas amostradas foram classificados como Latossolos Amarelos Distróficos, de textura argilosa e muito argilosa (Rodrigues et al., 2003).

Foram avaliados quatro sistemas de uso do solo:

- PD (Plantio Direto): Sistema consolidado há mais de 5 anos, com cultivo de soja (*Glycine max*) na safra e braquiária (*Brachiaria brizantha* cv. *Mandaru*) na entressafra, formando palhada para a próxima cultura. Sem revolvimento do solo.
- PC (Plantio Convencional): Sistema de cultivo de soja com preparo convencional do solo (aração e gradagem).
- PAST (Pastagem): Área de pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. *Mandaru* sob lotação contínua com bovinos de corte.
- CAP (Vegetação Secundária): Área de capoeira (vegetação nativa secundária) em estágio médio de regeneração (> 10 anos), utilizada como referência do potencial local de estoque de C e N.

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos (sistemas de manejo) e quatro repetições. Cada repetição consistiu em uma área independente (talhão/pastejo/parcela de vegetação) representativa do sistema de manejo, totalizando 16 unidades experimentais.

Em cada unidade experimental, as amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Foram coletadas: Amostras deformadas, compostas por 10 subamostras aleatórias por unidade experimental, para análise dos atributos químicos. E amostras indeformadas, coletadas com cilindros volumétricos de aço inoxidável (volume interno de 100 cm³), com três repetições por unidade experimental e profundidade, para determinação da densidade do solo (Ds). O número total de amostras indeformadas foi de 16 unidades x 2 profundidades x 3 repetições, totalizando 96 amostras.

As amostras, deformadas e indeformadas, foram analisadas para Densidade do Solo (Ds), determinada pelo método do anel volumétrico, secando-se as amostras indeformadas em estufa a 105 °C até massa constante (Teixeira et al., 2017).

O teor de COT foi determinado pelo método de oxidação úmida Walkley-Black, conforme descrito em Yeomans & Bremner (1988). O fator de correção de 1,33 foi aplicado para corrigir a

recuperação incompleta do carbono pela metodologia. A Matéria Orgânica do Solo (MOS) foi estimada pela equação: $MOS (g\ kg^{-1}) = COT (g\ kg^{-1}) \times 1,724$.

O teor de NT foi determinado pelo método de Kjeldahl semimicro, conforme detalhado em Silva (2009). A textura do solo foi analisada pelo método do hidrômetro, conforme descrito em Teixeira et al. (2017).

Os estoques de carbono orgânico (ECO) e nitrogênio total (ENT) para cada camada foram calculados com base na equação proposta por Rangel & Silva (2007):

$$\text{Estoque (Mg ha}^{-1}\text{)} = [\text{Teor (g kg}^{-1}\text{)} / 1000] \times Ds (\text{kg dm}^{-3}) \times \text{Espessura da camada (cm)} \times 100$$

onde:

- Teor = Teor de COT ou NT;
- Ds = Densidade do solo na camada correspondente;
- A constante 100 converte o resultado para Mg ha^{-1} (milhões de gramas por hectare).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA one-way) considerando o delineamento inteiramente casualizado. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a um nível de 5% de probabilidade. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa estatístico R (R Core Team, 2023).

4 RESULTADOS

Os teores e estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), a relação C/N e a densidade do solo (Ds) foram significativamente influenciados pelo sistema de manejo e pela profundidade (Tabela 1). A análise de variância (ANOVA) revelou efeito significativo ($p < 0,05$) para a interação Sistema $\times$ Profundidade para todas as variáveis, indicando que o efeito do manejo depende da camada amostrada.

Tabela 1. Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total (NT), Relação C/N, Densidade do Solo (Ds) e Estoques de Carbono (ECO) e Nitrogênio (ENT) em diferentes sistemas de manejo e profundidades em Paragominas, PA.

SISTEMA	PROF cm	C Org. g kg ⁻¹	N Tot. g kg ⁻¹	RELAÇÃO C/N	DG Mg m ⁻³
PASTAGEM	0-10	20,68 ± 4,34Aa	2,44 ± 1,11Aa	9,23 ± 2,23Aa	1,20 ± 0,03Aa
	10-20	14,14 ± 1,93Aa	0,60 ± 0,22Ba	26,01 ± 8,31Ba	1,25 ± 0,03Aa
	Total	18,50 ± 4,84	1,83 ± 1,27	14,82 ± 9,49	1,23 ± 0,04
CAPOEIRA	0-10	23,07 ± 1,90Aa	1,83 ± 0,16Aa	12,59 ± 0,53Aab	0,94 ± 0,07Ab
	10-20	20,38 ± 2,13Aa	1,81 ± 0,36Aab	11,49 ± 1,34Ab	1,01 ± 0,05Ab
	Total	22,17 ± 2,31	1,82 ± 0,23	12,22 ± 0,99	0,98 ± 0,06
PLANTIO	0-10	23,31 ± 1,83Aa	2,02 ± 0,35Aa	11,71 ± 1,37Aab	1,10 ± 0,08Aa
CONVENC	10-20	17,91 ± 2,08Aa	1,44 ± 0,09Aab	12,39 ± 0,92Ab	1,21 ± 0,06Aa
	Total	21,51 ± 3,21	1,83 ± 0,40	11,93 ± 1,25	1,16 ± 0,09
PLANTIO	0-10	30,04 ± 8,09Ab	2,18 ± 0,42Aa	13,68 ± 1,30Ab	0,97 ± 0,09Aab
DIRETO	10-20	15,82 ± 2,98Ba	1,01 ± 0,16Bab	15,62 ± 1,24Ab	1,15 ± 0,06Ba
	Total	25,30 ± 9,63	1,79 ± 0,67	14,33 ± 1,56	1,06 ± 0,12

Letras maiúsculas comparam profundidades dentro do mesmo sistema; letras minúsculas comparam sistemas na mesma profundidade (Teste de Tukey, $p < 0,05$). Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

1. Dinâmica do Carbono Orgânico Total (COT) e seus Estoques (ECO)

Como esperado, a vegetação secundária (capoeira) apresentou os maiores teores de COT na camada superficial (0–10 cm), não diferindo estatisticamente do Plantio Direto (PD). Este resultado demonstra a eficiência do PD em manter níveis elevados de COT, aproximando-se da condição de referência. Isto está diretamente associado ao menor revolvimento do solo e à cobertura permanente proporcionada pela palhada, que reduz perdas por erosão e mineralização, além de promover aporte contínuo de carbono (Sá et al., 2017; Maia et al., 2022; Guedes et al., 2012; Hoffmann et al., 2018).

O Plantio Convencional (PC) apresentou os menores teores de COT entre todos os sistemas, resultado da intensa oxidação da matéria orgânica causada pelo revolvimento frequente, que promove a ruptura de agregados e expõe o carbono protegido à ação microbiana (Cherubin et al., 2016; Slepeticien et al., 2024). A pastagem apresentou valor intermediário, condizente com sistemas que possuem aporte contínuo de resíduos (Cecagno et al., 2018), mas que podem sofrer compactação pelo pisoteamento animal (Lima et al., 2015).

Entretanto, ao calcular os estoques de carbono (ECO), que consideram a densidade do solo, observa-se que o PD e a pastagem não diferiram da capoeira na camada de 0–10 cm. Este resultado é crucial, pois demonstra que, em termos de massa de carbono por área – métrica ambientalmente relevante para o sequestro de C –, esses sistemas manejados são tão eficientes quanto a vegetação nativa nesta camada. Isto ressalta a importância de se considerar a Ds no cálculo dos estoques, evitando interpretações equivocadas baseadas apenas na concentração (Teixeira et al., 2017; Maróstica, 2023).

2. Dinâmica do Nitrogênio Total (NT) e seus Estoques (ENT)

Assim como para o COT, os maiores teores de NT foram verificados na capoeira, seguida pelo PD. A relação C/N mais elevada no PD (13,68) e na pastagem (26,01 na camada 10–20 cm) indica a presença de material orgânico mais recalcitrante (e.g., palhada de braquiária), o que pode temporariamente imobilizar o N no sistema, tornando-o menos disponível no curto prazo, mas constituindo um reservatório a médio e longo prazo (CECAGNO et al., 2018; VARGAS et al., 2005).

A menor relação C/N no PC e na capoeira (próxima de 12:1) sugere uma matéria orgânica mais humificada e estabilizada. O fato de não ter havido diferença significativa nos estoques de nitrogênio (ENT) entre a capoeira e o PD na camada superficial corrobora a premissa de que sistemas conservacionistas são capazes de manter o N no sistema, evitando perdas por lixiviação ou volatilização, que são amplificadas em sistemas perturbados como o PC (Costa et al., 2010; Zeferino et al., 2023; Paltineanu et al., 2024).

3. Densidade do Solo (Ds) e sua Relação com o Manejo

A densidade do solo seguiu a ordem esperada: capoeira < PD < pastagem < PC. Os valores mais baixos na capoeira são atribuídos à maior porosidade resultante da ação de organismos do solo, decomposição radicular e ausência de compactação antrópica (Silva-Olaya et al., 2022; Faustino et al., 2021). O PD apresentou Ds significativamente menor que o PC, um benefício direto da não mobilização do solo e da melhoria da estrutura proporcionada pelo aumento do COT e pela atividade biológica (Maia et al., 2022; Guedes et al., 2012). O valor mais alto de Ds no PC é um indicativo claro de degradação física, possivelmente devido à formação de pé-de-arado. O valor intermediário na pastagem reflete o equilíbrio entre a ação agregadora do sistema radicular e o efeito compactador do pisoteamento (Paciullo et al., 2010; Benevenuto et al., 2020; Grilo et al., 2024).

Os resultados confirmam parcialmente a hipótese inicial. O sistema de Plantio Direto mostrou-se superior ao Plantio Convencional em todos os aspectos, mantendo estoques de C e N equivalentes aos da vegetação secundária de referência na camada superficial (0–10 cm). A pastagem, embora apresente valores intermediários de teores, mostrou-se eficaz no acúmulo de estoques de carbono no perfil avaliado. O Plantio Convencional configurou-se como o sistema mais degradante, com os piores indicadores de qualidade do solo. Este estudo evidencia que a adoção de práticas conservacionistas, em especial o Plantio Direto bem manejado, é uma estratégia viável para a intensificação sustentável da agricultura na Amazônia, contribuindo para a manutenção da produtividade e para a mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono no solo (Sá et al., 2017; Costa et al., 2010; Maia et al., 2022; Guedes et al., 2012).

5 CONCLUSÕES

O sistema de Plantio Direto (PD) mostrou-se o mais promissor entre os sistemas manejados, apresentando teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) estatisticamente equivalentes aos da vegetação secundária (capoeira) na camada superficial do solo (0-10 cm).

A importância de calcular estoques (massa por área) e não apenas teores (concentração) foi evidenciada. Quando considerado o estoque de carbono (ECO), que leva em conta a densidade do solo (Ds), tanto o PD quanto a Pastagem performaram de forma equivalente à capoeira na camada 0-10 cm, indicando seu potencial para sequestro de carbono em termos ambientalmente relevantes.

O Plantio Convencional (PC) confirmou ser o sistema mais degradante, apresentando os menores teores de COT e os maiores valores de densidade do solo (Ds), um claro indicativo de degradação física e perda de qualidade do solo.

A pastagem mostrou um desempenho intermediário em termos de teores, mas revelou-se eficaz na acumulação de estoques de carbono no perfil avaliado, desempenhando um papel significativo na manutenção da matéria orgânica do solo.

A densidade do solo (Ds) foi um indicador sensível do manejo, seguindo a ordem crescente: Capoeira < Plantio Direto < Pastagem < Plantio Convencional. Isso reflete diretamente o grau de compactação e a saúde estrutural do solo em cada sistema.

A relação C/N mais elevada no PD e na Pastagem sugere um acúmulo de material orgânico mais recalcitrante, o que, apesar de poder imobilizar nitrogênio no curto prazo, constitui um reservatório estável de carbono e nitrogênio para a médio e longo prazo.

Conclui-se que a adoção de práticas conservacionistas, em especial o Plantio Direto bem manejado, é uma estratégia viável e eficaz para a sustentabilidade agrícola na região Amazônica, conciliando produtividade com a melhoria da qualidade do solo e a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono.

REFERÊNCIAS

- FERRAZ, R.P.D.; SKORUPA, L.A. Intensificação sustentável da agricultura brasileira: desafios e oportunidades. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 37-42, maio/ago. 2017. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1080531>
- MARÓSTICA, M.E.M. Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de produção no Cerrado. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2023. <https://doi.org/10.11606/D.11.2023.tde-01112023-160015>
- COSTA, F.S.; WADT, P.G.S.; BAYER, C.; SILVA, L.M.; CAMPOS FILHO, M.D.; MATOS, F.J.; BRITO, E.S.. (2020). Estoques de carbono e nitrogênio em sistemas de uso de um Argissolo amarelo no sudoeste da Amazônia. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18., 2010. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/860974>
- BÜNEMANN, E. K.; Giulia Bongiorno, Zhanguo Bai, Rachel E. Creamer, Gerlinde De Deyn, Ron de Goede, Luuk Fleskens, Violette Geissen, Thom W. Kuyper, Paul Mäder, Mirjam Pulleman, Wijnand Sukkel, Jan Willem van Groenigen, Lijbert Brussaard. Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, Volume 120, 2018. Pages 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- SILVA-OLAYA, A.M.; OLAYA-MONTES, A.; POLANÍA-HINCAPIÉ, K.L.; CHERUBIN, M.R.; DURAN-BAUTISTA, E.H.; ORTIZ-MOREA, F.A. Silvopastoral Systems Enhance Soil Health in the Amazon Region. Sustainability, 2022, 14, 320. <https://doi.org/10.3390/su14010320>
- FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C.R.; ANDRADE, G.R.P. Physical quality of soil under secondary forest, leguminous trees and degraded pasture. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02023>
- CECAGNO, D.; GOMES, M. V.; COSTA, S. E. V. G. de A.; MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. de O.; BAYER, C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F. Carbono orgânico do solo em um sistema integrado de produção agropecuária sob diferentes intensidades de pastejo. Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária), Recife, v. 13, n. 3, e5553, 2018.
- LIMA, F. V. D.; SILVINO, G. D. S.; MELO, R. S. D. S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. D. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em pastagem com pisoteamento contínuo no brejo da Paraíba. Revista Caatinga, v. 28, n. 4, p. 53–63, 2015
- CHERUBIN, M. R., KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; CERRI, C.E.P.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.C. I 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>
- T.A. Gardner, M. Benzie, J. Börner, E. Dawkins, S. Fick, R. Garrett, J. Godar, A. Grimard, S. Lake, R.K. Larsen, N. Mardas, C.L. McDermott, P. Meyfroidt, M. Osbeck, M. Persson, T. Sembres, C. Suavet, B. Strassburg, A. Trevisan, C. West, P. Wolvekamp. Transparency and sustainability in global commodity supply chains. World Development, Volume 121: 163-177, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.05.025>
- GUEDES, E. M. S.; FERNANDES, A. R.; LOBATO, A. K. S.; et al. Qualidade física do solo na Amazônia: aspectos e indicadores. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400021>

MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A.S.; SANTOS, T.C.; LYRA, G..B.; LAL, R.; ASSAD, E.D.; CERRI, C.E.P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for soil carbon sequestration and soil quality in tropical regions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105368>

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 2 set. 2025.

ZEFERINO, L. B., LUSTOSA FILHO, J. F., SANTOS, A. C. DOS, CERRI, C. E. P., & OLIVEIRA, T. S. de. Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to long-term pasture in Amazon rainforest-Cerrado transition environment. *Catena*, v. 231, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107346>

PALTINEANU, C.; DUMITRU, S.; VIZITIU, O.; MOCANU, V.; LĂCĂTUSU, A.; ION, S.; DOMNARIU, H. Soil organic carbon and total nitrogen stocks related to land use and basic environmental properties – assessment of soil carbon sequestration potential in different ecosystems. *CATENA*, Volume 246, 2024, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108435>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816224006325>)

CORBEELS, M., MARCHÃO, R. L., SIQUEIRA NETO, M., FERREIRA, E. G., MADARI, B. E., SCOPEL, E., & BRITO, O. R. (2016). Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. *Embrapa Cerrados*. doi: 10.1038/srep21450.

RANGEL, O. J. P., & SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(6), 1609–1623, 2007.

SÁ, J. C. DE M., LAL, R., CERRI, C. C., LORENZ, K., HUNGRIA, M., & CARVALHO, P. C. DE F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, 98:102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

SANTOS, H. G. dos et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

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

PACIULLO, D.S.C.; CASTRO, C.R.T.; GOMIDE, C.A.M.; FERNANDES, P.B.; ROCHA, W.S.D.; MÜLLER, M.D.; ROSSIELLO, R.O.P. Soil bulk density and biomass partitioning of *Brachiaria decumbens* in a silvopastoral system. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.67, n.5, p.598-603, September/October 2010

PEDRO A.N. BENEVENUTE, EVERTON G. DE MORAIS, ANDRÉ A. SOUZA, ISABELA C.F. VASQUES, DIONE P. CARDOSO, FLÁVIA R. SALES, EDUARDO C. SEVERIANO, BRUNO G.C. HOMEM, DANIEL R. CASAGRANDE, BRUNO M. SILVA. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, Volume 117, 2020, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>

KWANG, J.S.; THALER, E.A.; LARSEN, I.J. The future of soils in the midwestern United States. *Earth's Future*, 11(5). 2023. e2022EF003104. <https://doi.org/10.1029/2022EF003104>

VARGAS, L.K.; SELBACH, P.A.; SÁ, E.L.S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. *Cienc. Rural* 35 (1), Fev 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000100012>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p

SLEPETIENĖ, A.; KADZIENĖ, G.; SUPRONIENĖ, S.; SKERSIENĖ, A.; AUSKALNIENĖ, O. The content and stratification of SOC and its humified fractions using different soil tillage and intercropping. *Sustainability*, v. 16, n. 3, p. 953, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16030953>

REIS, G. I.; ESCADA, M. I. S.; ORTIZ, J. O. Expansão da soja na região sudoeste do Pará: explorando conexões com a infraestrutura logística. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 76, p. 71414, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-71414>

MATOS, M.S.; FILGUEIRAS, G.C.; SIMOES, J.E.M.; CUTRIM CARVALHO, A. Relação de produção da soja no estado do Pará. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL (SOBER), 54., 2016, Maceió. Anais [...]. Maceió, AL: SOBER, 2016. Tema: Desenvolvimento, território e biodiversidade. Disponível em: <https://livroaberto.ufpa.br/jspui/handle/prefix/1115> . Acesso em: 02/09/2025

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 19, n. 13, p. 1467–1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

ADEKIYA, A. O.; et al. Enhancing organic carbon content in tropical soils through crop residue retention. *Open Agriculture*, v. 17, p. 18743315282476, 2023. Disponível em: <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/17/ELOCATOR/e18743315282476/FULLTEXT/>. Acesso em: 2 set. 2025.

GIULIATTI, N.M.; RODRIGUES/ A.B.M.; JESUS, E.S.; JUNIOR, A.P. Variabilidade da precipitação mensal e anual no Município de Paragominas-Pa. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16 n.29; p. 1716 2019. <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2019a/agrar/variabilidade.pdf>

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. das C.; SILVA, J. M. L. da; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; GAMA, J. R. N. F.; VALENTE, M. A. Caracterização e classificação dos solos do município de Paragominas, Estado do Pará. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2003. 49 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 162). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/408067>

Hoffmann, R. B., Moreira, Évellyn E. A., Hoffmann, G. S. da S., & Araújo, N. S. F. de. (2018). Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 1(1), 168–178. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/738>

Grillo, V., Silva, A. A. P. da, Acorsi, M. G., & Gimenez, L. M. (2024). Alteração da densidade do solo por operações agrícolas mecanizadas: interação entre ambiente e equipamentos. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), e68965 . <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-017>