



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

ADRIELLY COSTA SOUZA

**ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA
TERRA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Belém

2025

ADRIELLY COSTA SOUZA

**ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA
TERRA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Dra. Gracialda Costa Ferreira
Co-orientador: Dr. Marcos André Piedade Gama

Belém

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S719e

Souza, Adrielly Costa

Estoque de Carbono Orgânico no Solo Sob Diferentes Usos da Terra Na Amazônia Oriental / Adrielly Costa Souza. - 2025.

40 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.

Orientador: Profa. Dra. Gracialda Costa Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama.

1. Mudança Climática. 2. Dinâmica do Carbono no Solo. 3. Município de Bujaru. I. Ferreira, Gracialda Costa , *orient.* II. Título

CDD 631.47811

ADRIELLY COSTA SOUZA

**ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA
TERRA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais.

Data da aprovação: 26/08/2025

Banca examinadora:

Orientador

Gracialda Costa Ferreira
Universidade Federal Rural da Amazônia

Coorientador

Marcos André Piedade Gama
Universidade Federal Rural da Amazônia

Membro 1

Deyvison Andrey Medrado Gonçalves
Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas

Membro 2

Cândido Ferreira de Oliveira Neto
Universidade Federal Rural da Amazônia

Membro 3

Gilson Sergio Bastos de Matos
Universidade Federal Rural da Amazônia

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e pela oportunidade de trilhar este caminho acadêmico.

À minha família, pelo amor, apoio incondicional e por acreditarem no meu potencial em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Gracialda Ferreira e Marcos André Piedade Gama, por todos os conselhos, pela escuta atenta e, sobretudo, pela confiança depositada em mim ao longo desta jornada.

À dedicada equipe de estagiários do PROSOLUM — Jaqueline, Emilly, Brenda, Jenniffer, Ágatha, Bedhalus, André, João e Carlos — meu sincero agradecimento pelo comprometimento, parceria em campo e dedicação nas atividades de laboratório.

Aos amigos “mestrandos” Bruna Feio, José Wilker e Diego Cardoso, pelas risadas, apoio e companheirismo que tornaram o dia mais leve e agradável.

À Júlia Rodrigues, pela amizade, incentivo e sensibilidade. Seu apoio e confiança fizeram diferença em muitos momentos.

Aos amigos Gabriel Pinheiro, Hiago Cardoso, Matheus Guedes e Stefany Figueiredo, pelo incentivo ao longo da minha trajetória e por compartilharem suas experiências de forma generosa e motivadora.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), pelo suporte ao longo do curso. Em especial, à Paula Pinheiro, pela atenção constante e disposição em ajudar sempre com gentileza e empatia.

À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FADESP) pelo financiamento da minha bolsa de mestrado, que foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa e para minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos os professores, técnicos, servidores e colegas da Universidade Federal Rural da Amazônia, que de alguma forma, contribuíram para meu aprendizado e desenvolvimento ao longo do mestrado.

RESUMO

A Amazônia desempenha um papel crucial no ciclo global do carbono, armazenando uma quantidade significativa de carbono no solo, especialmente nas camadas superficiais. No entanto, práticas como desmatamento, expansão de pastagens e cultivo de monoculturas têm alterado esses estoques, contribuindo para as mudanças climáticas. Este estudo foi conduzido na Amazônia oriental, município de Bujaru, estado do Pará, com o objetivo de avaliar os efeitos dos diferentes usos do solo (pastagem em pousio, plantio de eucalipto e floresta secundária) sobre os estoques de carbono orgânico do solo. Foram coletadas amostras de solo em quatro camadas (0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm) em dez parcelas de 20 m x 50 m em cada área de estudo. Os resultados demonstraram que os estoques de carbono foram significativamente maiores nas camadas superficiais (0–10 cm), com a pastagem em pousio apresentando 0,2997 Mg ha⁻¹ (29,97% do total), enquanto a floresta secundária e o eucalipto apresentaram 24,81% e 22,17%, respectivamente. A análise estatística indicou que o estoque de carbono variou em função da camada, com correlações positivas entre o carbono orgânico e a matéria orgânica ($r = 0,67$, $p < 0,001$). A floresta secundária demonstrou uma distribuição mais equilibrada de carbono, enquanto na pastagem e no eucalipto se concentraram mais nas camadas superiores. Este estudo contribui para o entendimento da relação entre o uso do solo e o sequestro de carbono, oferecendo subsídios para práticas de manejo sustentável e estratégias de mitigação das mudanças climáticas na Amazônia.

Palavras-chave: Mudança Climática; Dinâmica do Carbono no Solo; Fertilidade do Solo.

ABSTRACT

The Amazon plays a crucial role in the global carbon cycle, storing a significant amount of carbon in the soil, particularly in the surface layers. However, practices such as deforestation, pasture expansion, and monoculture cultivation have altered these stocks, contributing to climate change. This study was conducted in the eastern Amazon, in the municipality of Bujaru, Pará state, with the objective of evaluating the effects of different land uses (fallow pasture, eucalyptus plantation, and secondary forest) on soil organic carbon stocks. Soil samples were collected from four depths (0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm) in ten 20 m × 50 m plots within each study area. The results showed that carbon stocks were significantly higher in the surface layers (0–10 cm), with fallow pasture storing 0.2997 Mg ha⁻¹ (29.97% of the total), while secondary forest and eucalyptus accounted for 24.81% and 22.17%, respectively. Statistical analysis indicated that carbon stocks varied according to depth, with positive correlations between organic carbon and organic matter ($r = 0.67$, $p < 0.001$). Secondary forest showed a more balanced carbon distribution, whereas pasture and eucalyptus concentrated carbon in the upper layers. This study contributes to the understanding of the relationship between land use and carbon sequestration, providing insights for sustainable management practices and climate change mitigation strategies in the Amazon.

Keywords: Climate Change; Soil Carbon Dynamics; Soil Fertility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização dos ecossistemas com diferentes usos do solo no município de Bujaru, Pará, Brasil: plantio de eucalipto (A), pastagem em pousio (B) e floresta secundária (C).	17
Figura 2. Média $\pm$ desvio padrão do estoque de carbono (a) e densidade do solo (b) em diferentes usos do solo no município de Bujaru, Pará.	21
Figura 3. Correlação de Spearman entre atributos físicos e químicos do solo e o estoque de carbono do solo de diferentes usos do solo no município de Bujaru, Pará.	22
Figura 4. Análise de componentes principais dos atributos químicos e estoque de carbono do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a), 10 - 20 cm (b), 20 - 40 cm (c) e 40 - 60 cm (d) em diferentes usos do solo no município de Bujaru, Pará.	24
Figura 5. Análise de agrupamento utilizando o método de partição ao redor dos medoids (PAM) para atributos físicos e químicos do solo e o estoque de carbono do solo de diferentes usos do solo no município de Bujaru, Pará.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias e desvios-padrão do estoque de carbono do solo e da densidade aparente em diferentes usos e profundidades.....	20
Tabela 2. Distribuição percentual do estoque de carbono nas diferentes profundidades do solo (0 – 60 cm) sob três tipos de uso da terra: pastagem, plantio de eucalipto e floresta nativa.	26

SUMÁRIO

Contextualização.....	11
Hipóteses.....	11
Objetivos.....	12
Referências	12
1. Introdução	15
2. Material e Métodos	16
2.1. Área de estudo	16
2.2. Coleta e análise de solo.....	17
2.3. Análise estatística	19
3. Resultados.....	19
4. Discussão.....	26
4. Conclusão.....	29
5. Referências	30
APÊNDICE A.....	40

Contextualização

A Amazônia, enquanto uma das maiores florestas tropicais do mundo, exerce um papel crucial no ciclo global do carbono, armazenando uma parte significativa do carbono terrestre e atuando diretamente nos ciclos biogeoquímicos globais (Malhi *et al.*, 2021). Neste contexto, o carbono orgânico no solo (CO) emerge como um indicador crítico da capacidade de sequestro de carbono de ecossistemas tropicais. No entanto, as pressões antropogênicas sobre a região, incluindo a expansão da pastagem, o plantio de monoculturas como o eucalipto e a exploração madeireira, têm transformado a paisagem amazônica e alterado profundamente o COS, com implicações diretas para a dinâmica climática (Azevedo *et al.*, 2024; Durigan *et al.*, 2017; Fujisaki *et al.*, 2015).

Embora a relação entre uso do solo e variação de CO seja reconhecida, existem lacunas substanciais na compreensão dos efeitos do uso da terra em diferentes profundidades do solo. As camadas superficiais (0-10 cm e 10 – 20 cm) são frequentemente estudadas (Araújo *et al.*, 2023; Soares *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2023), porém as camadas mais profundas têm sido menos estudadas. Essa carência de dados limita a compreensão sobre a eficácia das diferentes práticas de uso da terra em manter ou restaurar os estoques de carbono no solo a longo prazo. A pastagem, amplamente expandida na região, é frequentemente associada à perda de carbono devido à compactação do solo e degradação da matéria orgânica (Mir *et al.*, 2023; Qin *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2021), enquanto o plantio de eucalipto apresenta tanto desafios quanto oportunidades para o sequestro de carbono, dependendo das práticas de manejo adotadas (Odebiri *et al.*, 2024). Ao mesmo tempo, áreas de florestas, quando manejadas adequadamente, continuam a desempenhar um papel fundamental na manutenção dos estoques de carbono no solo (Huang *et al.*, 2023; Mir *et al.*, 2023; L. F. T. Souza *et al.*, 2023).

Sendo assim, esta dissertação visa contribuir com os estudos sobre estoque de carbono orgânico no solo em diferentes profundidades e suas variações nos diversos usos da terra. Além disso, os resultados podem apoiar o desenvolvimento de estratégias para promover a sustentabilidade e conservação ambiental, com foco na proteção dos ecossistemas da Amazônia e na mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Hipóteses

a) Apesar das distintas características de manejo e sucessão ecológica, o estoque de carbono orgânico nas camadas superficiais do solo (0–30 cm) será semelhante entre floresta secundária, pastagem em pousio e plantio de eucalipto.

b) O estoque de carbono orgânico no solo apresentará maior acúmulo nas camadas superficiais, concentrando aproximadamente 50% do total nos primeiros 30 cm, independentemente do uso da terra.

Objetivos

a) Gerais

Investigar as mudanças do estoque de carbono orgânico em solo sob diferentes usos e cobertura do solo, em área localizada no município de Bujaru, estado do Pará.

b) Específicos

- Avaliar o conteúdo de carbono e a densidade do solo nos sistemas avaliados;
- Quantificar o estoque de carbono no solo em função do uso e cobertura do solo;
- Quantificar o estoque de carbono nas camadas do solo maior que 30 cm de profundidade;
- Avaliar a contribuição percentual do estoque de carbono em cada camada em relação ao estoque total de carbono no solo.

Referências

Azevedo, J.C. de, Cardoso, A. da S., Lage Filho, N.M., Faturi, C., Silva, T.C. da, Domingues, F.N., Costa, V.E., Ruggieri, A.C., Reis, R.A., do Rêgo, A.C., 2024. Effects of Agricultural Expansion on Soil Carbon and Nitrogen Stocks in the Amazon Deforestation Arc. *Soil Systems* 2024, Vol. 8, Page 25 8, 25. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS8010025>

Araújo, R.M., da Silva, D.M.P., Campos, M.C.C., de Lima, A.F.L., Brito, W.B.M., Dos Santos, L.A.C., da Cunha, J.M., 2023. Spatial variability of organic carbon and soil carbon stock in pasture areas in União Bandeirantes, Rondônia. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 1013–1024. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V16.2.P1013-1024>

Durigan, M.R., Cherubin, M.R., de Camargo, P.B., Ferreira, J.N., Berenguer, E., Gardner, T.A., Barlow, J., Dias, C.T. dos S., Signor, D., de Oliveira, R.C., Cerri, C.E.P., 2017. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 379 9, 379. <https://doi.org/10.3390/SU9030379>

- Fujisaki, K., Perrin, A.S., Desjardins, T., Bernoux, M., Balbino, L.C., Brossard, M., 2015. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Glob Chang Biol* 21, 2773–2786. <https://doi.org/10.1111/GCB.12906>
- Huang, B., Zhang, L., Cao, Y., Yang, Y., Wang, P., Li, Z., Lin, Y., 2023. Effects of land-use type on soil organic carbon and carbon pool management index through arbuscular mycorrhizal fungi pathways. *Glob Ecol Conserv* 43, e02432. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2023.E02432>
- Malhi, Y., Melack, J., Gatti, L., Ometto, J., Kesselmeier, J., Wolff, S., Aragão, L., Costa, M., Saleska, S., Pangala, S., Basso, L., Rizzo, L., de Araújo, A., Restrepo-Coupe, N., & Silva-Junior, C. (2021). Chapter 6: Biogeochemical Cycles in the Amazon. In Y. Malhi *et al.* (Eds.), *Biogeochemical Cycles in the Amazon* (pp. 121-150). Springer. <https://doi.org/10.55161/TAKR3454>
- Mir, Y.H., Ganie, M.A., Shah, T.I., Aezum, A.M., Bangroo, S.A., Mir, S.A., Dar, S.R., Mahdi, S.S., Baba, Z.A., Shah, A.M., Majeed, U., Minkina, T., Rajput, V.D., Dar, A.A., 2023. Soil organic carbon pools and carbon management index under different land use systems in North western Himalayas. *PeerJ* 11, e15266. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.15266/SUPP-1>
- Odebiri, O., Mutanga, O., Odindi, J., Slotow, R., Mafongoya, P., Lottering, R., Naicker, R., Nyasha Matongera, T., Mngadi, M., 2024. Remote sensing of depth-induced variations in soil organic carbon stocks distribution within different vegetated landscapes. *Catena (Amst)* 243, 108216. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2024.108216>
- Qin, C., Li, S.L., Yu, G.H., Bass, A.M., Yue, F.J., Xu, S., 2022. Vertical variations of soil carbon under different land uses in a karst critical zone observatory (CZO), SW China. *Geoderma* 412, 115741. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2022.115741>
- Salazar, R., Alegre, J., Pizarro, D., Duff, A.J., García, C., Gómez, C., 2024. Soil carbon stock potential in pastoral and silvopastoral systems in the Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems* 98, 2157–2167. <https://doi.org/10.1007/S10457-024-00969-W/FIGURES/3>
- Soares, M.D.R., Campos, M.C.C., Da Cunha, J.M., De Souza, Z.M., De Oliveira, I.A., De Aquino, R.E., Mantovanelli, B.C., Oliveira, L.S., 2018. Spatial variability of physical attributes and soil aggregates in archaeological dark dirt under pasture. *Revista Ambiente & Água* 13, e2002. <https://doi.org/10.4136/AMBI-AGUA.2002>

Souza, A.S. de, Kato, O.R., Freitas, L. de S., Galvão, J.R., 2023. Estoque de carbono em frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de uso na Amazônia oriental. *Research, Society and Development* 12, e0212440330. <https://doi.org/10.33448/RSD-V12I4.40330>

Souza, L.F.T., Hirmas, D.R., Sullivan, P.L., Reuman, D.C., Kirk, M.F., Li, L., Ajami, H., Wen, H., Sarto, M.V.M., Loecke, T.D., Rudick, A.K., Rice, C.W., Billings, S.A., 2023. Root distributions, precipitation, and soil structure converge to govern soil organic carbon depth distributions. *Geoderma* 437, 116569. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116569>

Zhao, Zhizhong, Zhao, Zeyang, Fu, B., Wang, J., Tang, W., 2021. Characteristics of soil organic carbon fractions under different land use patterns in a tropical area. *J Soils Sediments* 21, 689–697. <https://doi.org/10.1007/S11368-020-02809-7/METRICS>

1. Introdução

A Amazônia desempenha um papel essencial na regulação climática global, sendo um dos maiores reservatórios de carbono do planeta. A estimativa é que nesta região o solo armazene entre 47 e 67 bilhões de toneladas (Mg) de carbono nos primeiros um metro de profundidade, com aproximadamente metade desse estoque concentrado nos 30 cm superficiais, tornando-o altamente vulnerável a mudanças de uso da terra, como desmatamento, a expansão de pastagens e o cultivo de monoculturas (Batjes and Dijkshoorn, 1999; Moraes *et al.*, 1995). Essas práticas alteram significativamente o ciclo do carbono e afetam a capacidade do solo de armazenar carbono, o que contribui diretamente para o agravamento das mudanças climáticas (de Oliveira *et al.*, 2024; Salazar *et al.*, 2024).

Embora a pesquisa sobre o carbono do solo tenha se concentrado principalmente nas camadas superficiais (0-30 cm), a compreensão das camadas mais profundas do solo, como entre 40 e 60 cm, é essencial para uma avaliação mais precisa e abrangente do ciclo (Zhang *et al.*, 2019) e estoque de carbono. Estudos têm mostrado que as camadas de 40 – 60cm tende apresentar o carbono orgânico mais estável e menos suscetível às variações sazonais (Balesdent *et al.*, 2018; Gross and Harrison, 2019), uma vez que a atividade microbiana nessa camada é menor, e consequentemente, a decomposição do carbono também (Fontaine *et al.*, 2007; Soucémariadin *et al.*, 2018). Além disso, mudanças no uso da terra, como a conversão de florestas em pastagens ou monoculturas, podem provocar alterações significativas não apenas na superfície, mas também nas camadas inferiores, impactando o equilíbrio do carbono no perfil completo do solo (Li *et al.*, 2021). Embora existam estudos sobre o impacto das mudanças de uso na camada superficial, o comportamento do carbono nas camadas de 40 – 60 cm ainda carecem de informação, principalmente na região amazônica, sob diferentes usos do.

A pastagem em pousio, uma prática comum na Amazônia, envolve o abandono temporário de áreas de pastagem para recuperação da vegetação e do solo, após pisoteio do gado, resultando em perdas de carbono devido à degradação da matéria orgânica e à compactação do solo (Ferreira Leite de Lima *et al.*, 2022; Melo *et al.*, 2012). O monocultivo de eucalipto, considerado um dos principais tipos de reflorestamento do Brasil, também desempenha um papel importante no estoque de carbono, já que captura o CO₂ da atmosfera e armazena-o na biomassa das árvores e do solo (Morales *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2023). As florestas secundárias, formadas a partir da regeneração natural após o abandono de atividades de uso da terra, ajudam a recuperar o carbono perdido durante a degradação, contribuindo

significativamente para a mitigação das mudanças climáticas e a recuperação do equilíbrio ecológico (Heinrich *et al.*, 2021; Poorter *et al.*, 2016).

Diante disso, a hipótese deste trabalho é que as práticas de manejo em áreas de plantio de eucalipto e com pastagem em pousio podem estabilizar o CO em níveis comparáveis aos de florestas secundárias, com maior estoque de carbono orgânico (COS) nas camadas superficiais do solo. Considera-se ainda que aproximadamente metade do estoque total esteja concentrada nos primeiros 30 cm de profundidade, independentemente do uso e cobertura da terra. Este estudo visa investigar o impacto de diferentes usos do solo na dinâmica do COS, especificamente em áreas de pastagem em pousio, plantio de eucalipto e floresta secundária, com ênfase nas variações dos estoques de carbono nas camadas 0- 60 cm do solo.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em uma propriedade rural no município de Bujaru, nordeste do estado do Pará, Amazônia brasileira (Figura 1), com a presença de monocultivo de eucalipto, pastagem em pousio e floresta secundária. A região apresenta vegetação do tipo Floresta Densa de baixos platôs e Florestas Secundárias em diversos estágios de regeneração, com presença de muitas atividades de desmatamento (Silva *et al.*, 2016). O clima da região é equatorial úmido (Af), conforme a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 26,3°C, precipitação pluviométrica média anual de 3.102mm e média da umidade relativa do ar em 86,5% (Rodrigues *et al.*, 2003). O solo da área de estudo é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, textura média (EMBRAPA; IBGE, 2001).

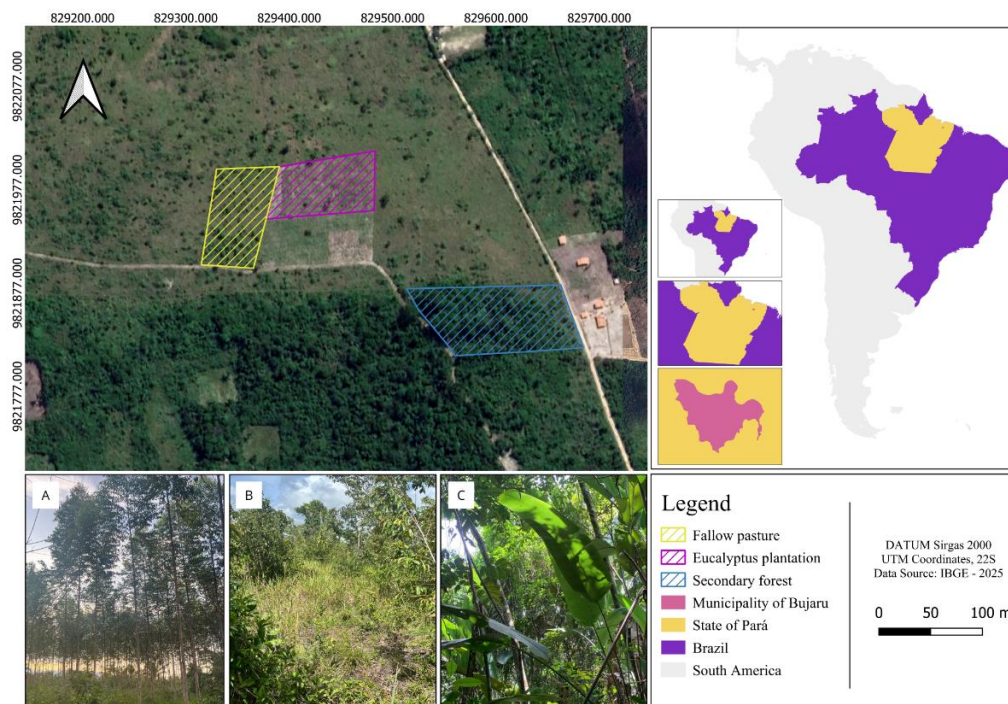


Figura 1. Localização dos ecossistemas com diferentes usos do solo no município de Bujaru, Pará, Brasil: plantio de eucalipto (A), pastagem em pousio (B) e floresta secundária (C).

O plantio de eucalipto foi realizado em 2022, em área anteriormente ocupada com pastagem de capim *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, após o preparo de área com aração e gradagem para incorporar a biomassa vegetal e diminuir o adensamento da camada superficial do solo. Foram utilizadas mudas do híbrido Urograndis (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden), plantadas em covas de 40 cm x 40 cm x 40 cm, com espaçamento de 6 m x 2 m, totalizando 833 plantas por hectare. A calagem foi realizada na dosagem equivalente a 0,9 t ha⁻¹, utilizando calcário com PRNT 99%, pelo método de saturação por bases.

A área de pastagem, com lotação excessiva de animais por mais de 15 anos, inicialmente estabelecida com o capim *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, apresenta vegetação arbustiva e outras espécies que não são o capim foco. Essa área não é utilizada para pastejo há 5 anos.

A floresta secundária, que serve como referência para este estudo, está em processo de sucessão ecológica há mais de 15 anos, após ter sido submetida, por longo período, à agricultura familiar de corte e queima para o cultivo de mandioca.

2.2. Coleta e análise de solo

Para este trabalho foram coletadas amostras para determinação da densidade do solo (DS) e para análise química do carbono orgânico (CO). Assim foram instaladas dez parcelas

em cada uma das áreas, com dimensões de 20m x 50 m, onde foram coletadas amostras nas profundidades 0 – 10 cm; 10 – 20 cm; 20 – 40 cm e 40 – 60 cm. As amostras para DS foi utilizado o trado tipo TAI (trado para amostra indeformada) com anéis cilíndricos de aço inoxidável (com dimensões aproximadas de 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura) e para amostras de CO o trado holandês para coleta de amostras deformadas.

As amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), onde foram transferidas para recipientes de alumínio e secas a 105°C em estufa com circulação de ar por 24 horas. Após a secagem, foi obtido o peso seco de cada amostra com o auxílio de uma balança analítica. A análise dos atributos químicos pH em água, Matéria Orgânica (MO), Carbono Orgânico (CO), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio trocáveis (Al), Acidez Potencial (H + Al), soma de Bases (SB), Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0 (T), Saturação por Bases (V) e Saturação por Alumínio (m) seguiram o a metodologia de Teixeira *et al.* (2017) e em seguida foram classificados qualitativamente conforme as interpretações de Alvarez *et al.* (1999).

Para determinação da densidade do solo utilizou-se os valores de massa seca e os dados de volume do respectivo anel utilizado na coleta em campo (Eq. 1; Teixeira *et al.*, 2017).

$$Ds = \frac{Ms}{V} \quad (Eq. 1)$$

Na qual: Ds – Densidade do solo calculada, em g cm⁻³; Ms – Massa de solo seco, em g, após secagem em estufa a 105 °C até atingir peso constante, subtraídas da massa do anel vazio, limpo e seco; V – Volume do cilindro, em cm³, correspondente ao volume original da amostra indeformada.

O estoque de carbono orgânico do solo foi determinado a partir dos dados de densidade do solo, conteúdo de carbono orgânico e espessura das camadas amostradas (Eq. 2; Veldkamp *et al.*, 2020).

$$COS = \frac{CO \times Ds \times ep}{10} \quad (Eq. 2)$$

Na qual: COS = estoque de C orgânico na profundidade considerada (Mg ha⁻¹); CO = conteúdo de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg⁻¹); Ds = densidade do solo da profundidade (kg dm⁻³); ep = espessura da camada considerada (cm).

Além disso, para cada área de estudo (eucalipto, pastagem abandonada e floresta secundária) e para cada camada de solo, calculou-se a contribuição percentual do estoque de

carbono em cada camada (Eq. 3), a fim de entender qual camada e qual uso do solo apresentam maior contribuição para o estoque total de carbono.

$$C\% = \left(\frac{ECC}{ETC} \right) \times 100 \quad (Eq. 3)$$

Na qual: C% = Contribuição percentual (%); ECC = Estoque de carbono na camada (Mg ha⁻¹); ETC = Estoque total de carbono (Mg ha⁻¹).

2.3. Análise estatística

Os dados de estoque de carbono e densidade foram testados quanto a normalidade e homoscedasticidade de variância por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os pressupostos não foram atendidos, por isso foram identificados e removidos outliers com base no intervalo interquartil (IQR), onde valores inferiores a (Q1 – 1,5*IQR) ou superiores a (Q3 + 1,5* IQR) foram considerados outliers e excluídos das análises subsequentes. Após isso os pressupostos foram atendidos e conduziu-se uma Análise de Variância de duas vias (ANOVA Two – Way, p < 0,05) em que as variáveis preditoras foram área e profundidade de coleta do solo.

Uma análise de componentes principais (PCA) para cada uma das profundidades foi utilizada para explorar as relações entre atributos químicos e o estoque de carbono do solo para os diferentes usos do solo (floresta, pastagem e eucalipto). Para eliminar o efeito das diferentes unidades de medida os dados foram padronizados, utilizando o argumento `scale.unit = TRUE` do pacote `FactoMineR` (Lê *et al.*, 2008) . Adicionalmente, considerando todas as profundidades, foi aplicada uma análise de agrupamento utilizando o método de partição ao redor dos medoids (PAM), visando verificar padrões de similaridade entre as áreas de uso da terra. A visualização dos agrupamentos foi realizada com a função `autoplot()` do pacote `ggfortify`, incorporando os resultados da função `pam()` do pacote `cluster` (Maechler *et al.*, 2025)

Os dados de fertilidade foram testados quanto a normalidade, por meio do teste de Shapiro-Wilk (p < 0,05) e devido ao não atendimento deste pressuposto, utilizou-se a análise de correlação de Spearman entre o estoque de carbono, densidade e fertilidade do solo. Todas as análises estatísticas e gráficos foram realizados por meio do software R v.4.4.3 (R Core Team, 2025)

3. Resultados

Os atributos de fertilidade do solo das áreas de estudo, de modo geral, foram classificados como baixa fertilidade. Os resultados indicaram que o solo, apresentou teores de

P, K, Ca e Mg majoritariamente "Muito Baixos" e V "Muito Baixa". O pH em água variou de "Acidez Média" no eucalipto e "Acidez Elevada" na floresta e pasto. Os teores de MO e CO mantiveram-se entre "Baixo" no eucalipto e "Médio" na camada de 0-10 cm na floresta e pasto. A m foi predominantemente "Alta", enquanto a SB foi "Muito Baixa" e a T, "Média" (Apêndice A).

Os resultados do conteúdo de carbono orgânico do solo variaram entre os diferentes usos e profundidades avaliados. No cultivo de eucalipto, os teores oscilaram de 11,12 g kg⁻¹ na camada de 0–10 cm a 5,03 g kg⁻¹ na camada de 40–60 cm, com média de 8,20 g kg⁻¹. Na floresta, os valores foram de 11,86 g kg⁻¹ na camada superficial a 4,86 g kg⁻¹ na camada mais profunda, resultando em média de 8,27 g kg⁻¹. Já no pasto, os teores variaram de 14,12 g kg⁻¹ (0–10 cm) a 4,35 g kg⁻¹ (40–60 cm), com média de 8,75 g kg⁻¹. A densidade do solo apresentou variação de 1,51 a 1,74 g cm⁻³, com o menor valor observado na camada superficial sob floresta e o maior na camada de 40–60 cm sob floresta. O estoque de carbono orgânico variou de 14,5 a 22,8 Mg ha⁻¹, sendo os maiores valores registrados na camada superficial (0–10 cm) sob pastagem e os menores na camada mais profunda (40–60 cm) sob a mesma área. Esses resultados permitem avaliar o comportamento do conteúdo de carbono orgânico e da densidade do solo em função do uso e da profundidade, servindo de base para a interpretação estatística e discussão subsequente.

Tabela 1. Médias e desvios-padrão do estoque de carbono do solo e da densidade aparente em diferentes usos e profundidades.

Área	Camada	COS	DP	Ds	DP
Eucalipto	0-10	16,6	7,09	1,52	0,0923
	10-20	16,5	4,63	1,65	0,1120
	20-40	21,1	5,74	1,72	0,0684
	40-60	17,2	4,82	1,71	0,0312
Floresta	0-10	17,0	6,35	1,51	0,0749
	10-20	14,8	3,50	1,65	0,0523
	20-40	17,7	5,92	1,68	0,0648
	40-60	14,9	3,94	1,71	0,0967
Pasto	0-10	22,8	4,80	1,61	0,0600
	10-20	17,6	3,04	1,69	0,0653
	20-40	21,1	4,33	1,73	0,0509
	40-60	14,5	4,93	1,67	0,0101

Legenda: COS: Estoque de Carbono Orgânico no solo (Mg/ha); Ds: Densidade Aparente do solo (g cm⁻³); DP: Desvio Padrão.

O estoque de carbono do solo não apresentou diferença estatística para a interação entre área e profundidade, nem para os fatores isolados (Figura 2a). Resultado semelhante foi observado para a densidade do solo (Figura 2b).

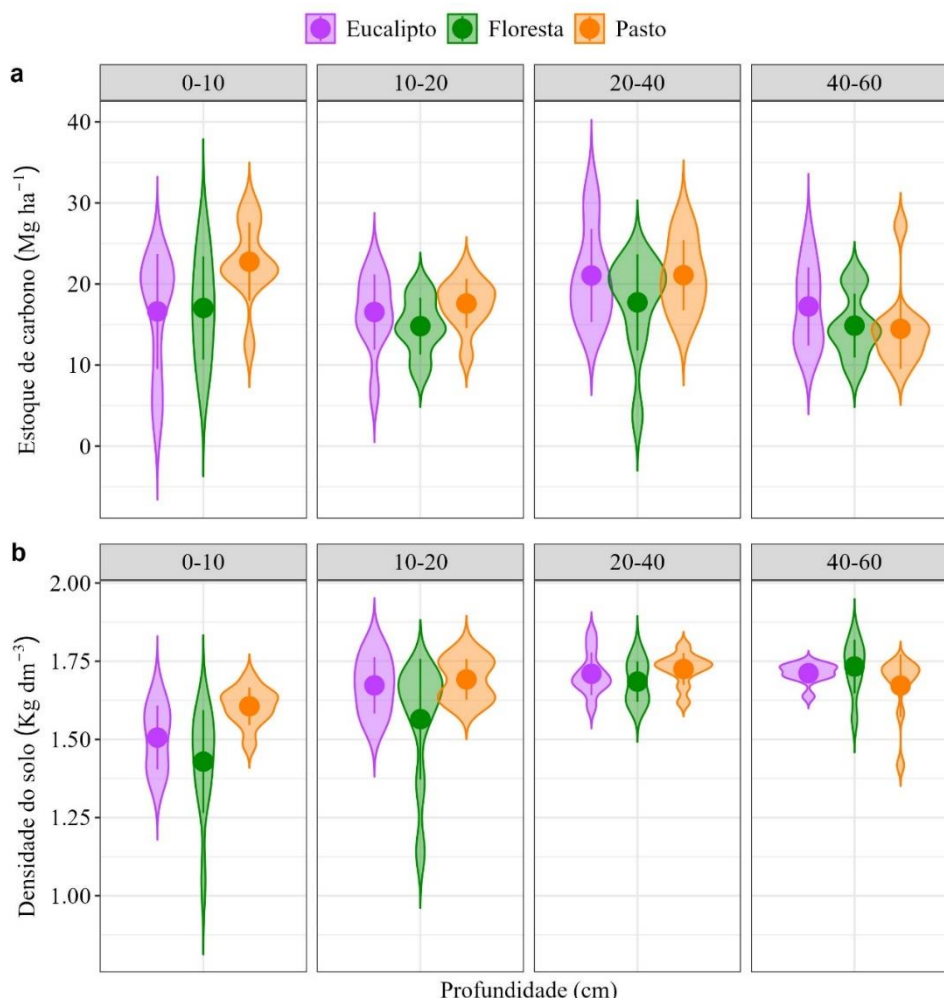


Figura 2. Média $\pm$ desvio padrão do estoque de carbono (a) e densidade do solo (b) em diferentes usos do solo no município de Bujaru, estado do Pará.

A profundidade do solo apresentou correlação negativa com os teores de carbono orgânico ($r = -0.71$, $p < 0.001$), matéria orgânica ($r = -0.71$, $p < 0.001$), fósforo ($r = -0.78$, $p < 0.001$) e acidez potencial (H+Al) ($r = -0.74$, $p < 0.001$; Figura 3). Também foi observada correlação positiva entre profundidade e densidade do solo ($r = 0.57$, $p < 0.001$). Os estoques de carbono do solo apresentaram correlação positiva com os teores de carbono orgânico ($r = 0.67$, $p < 0.001$) e matéria orgânica ($r = 0.67$, $p < 0.001$), reforçando a relação direta entre esses atributos. O pH do solo, por sua vez, teve correlação positiva com cálcio ($r = 0.26$, $p = 0.0048$) e magnésio ($r = 0.26$, $p = 0.0040$), e correlação negativa com H+Al ($r = -0.31$, $p = 0.0006$). O teor de fósforo apresentou correlação significativa com carbono orgânico ($r = 0.56$, $p < 0.001$),

matéria orgânica ($r = 0.56$, $p < 0.001$), potássio ($r = 0.51$, $p < 0.001$), magnésio ($r = 0.44$, $p < 0.001$) e $H+Al$ ($r = 0.63$, $p < 0.001$; Figura 3).

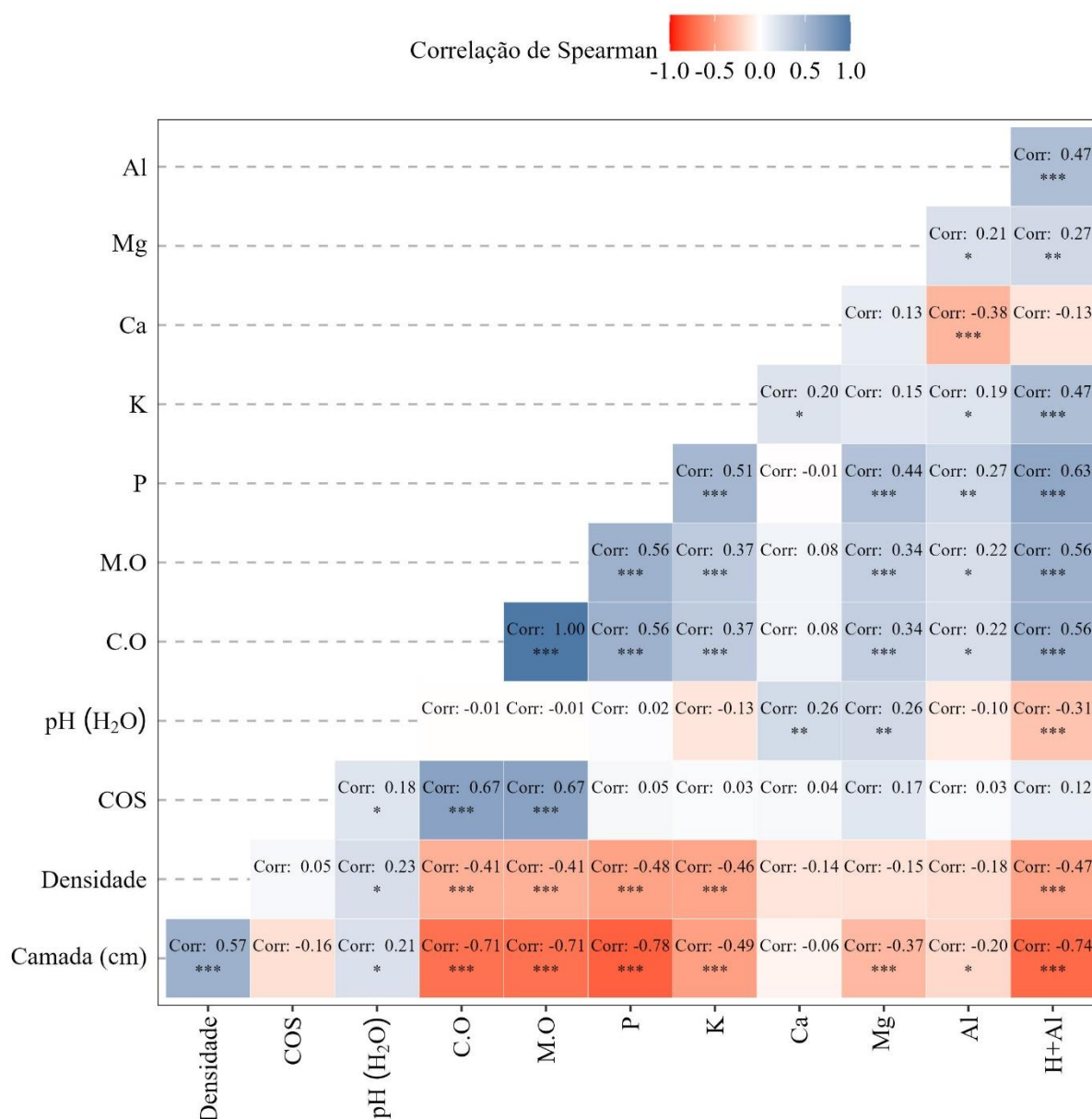


Figura 3. Correlação de Spearman entre atributos físicos e químicos do solo e o estoque de carbono do solo de diferentes usos do solo no município de Bujaru, estado do Pará.

Na camada de 0–10 cm, o estoque de carbono se associou fortemente ao carbono orgânico, à matéria orgânica e ao cálcio, todos com altas cargas ($> 0,8$) em Dim.1 e Dim.2, que explicaram juntas 54,4% da variância total (Figura 4a). Na camada de 10–20 cm, padrões semelhantes se mantiveram: o estoque de C esteve novamente fortemente correlacionado ao CO, à M.O. e ao pH e magnésio (Figura 4b). Na camada de 20–40 cm, os dois primeiros eixos da PCA explicaram 55,13% da variância total, com destaque para o Ca (positivamente) e o Al

(negativamente) no eixo 1. O segundo eixo foi fortemente influenciado por variáveis relacionadas ao carbono (CO, M.O. e COS), todas positivamente correlacionadas. O P e o K se destacaram no eixo 3, refletindo uma separação adicional relacionada à fertilidade (Figura 4c). Na profundidade de 40–60 cm, os dois primeiros eixos explicaram 57,71% da variância, sendo Ca a principal variável no eixo 1 e os teores de carbono (CO, M.O. e COS) com forte influência positiva no eixo 2. O Al e o pH também contribuíram para a variação entre os eixos (Figura 4d).

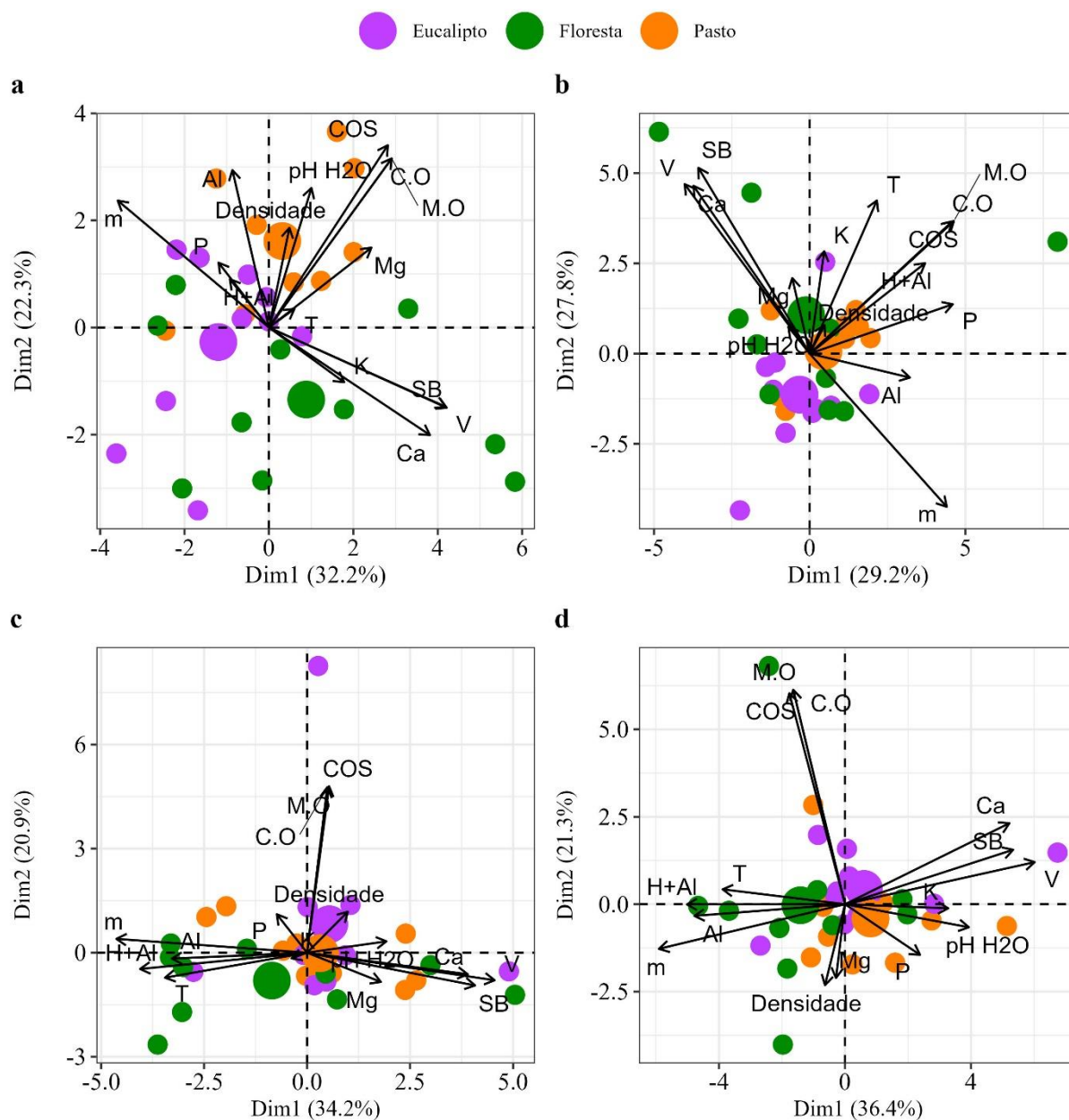


Figura 4. Análise de componentes principais dos atributos químicos e estoque de carbono do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a), 10 - 20 cm (b), 20 - 40 cm (c) e 40 - 60 cm (d) em diferentes usos do solo no município de Bujaru, estado do Pará.

O resultado do agrupamento com o método PAM indicou que todos os pontos de amostra foram alocados em um único grupo (cluster 1). O ponto central representativo possui pH 5,64, densidade de 1,74 g/cm³, estoque de carbono de 16,52 Mg ha⁻¹ e M.O. de 16,40 g kg⁻¹ (Figura 4).

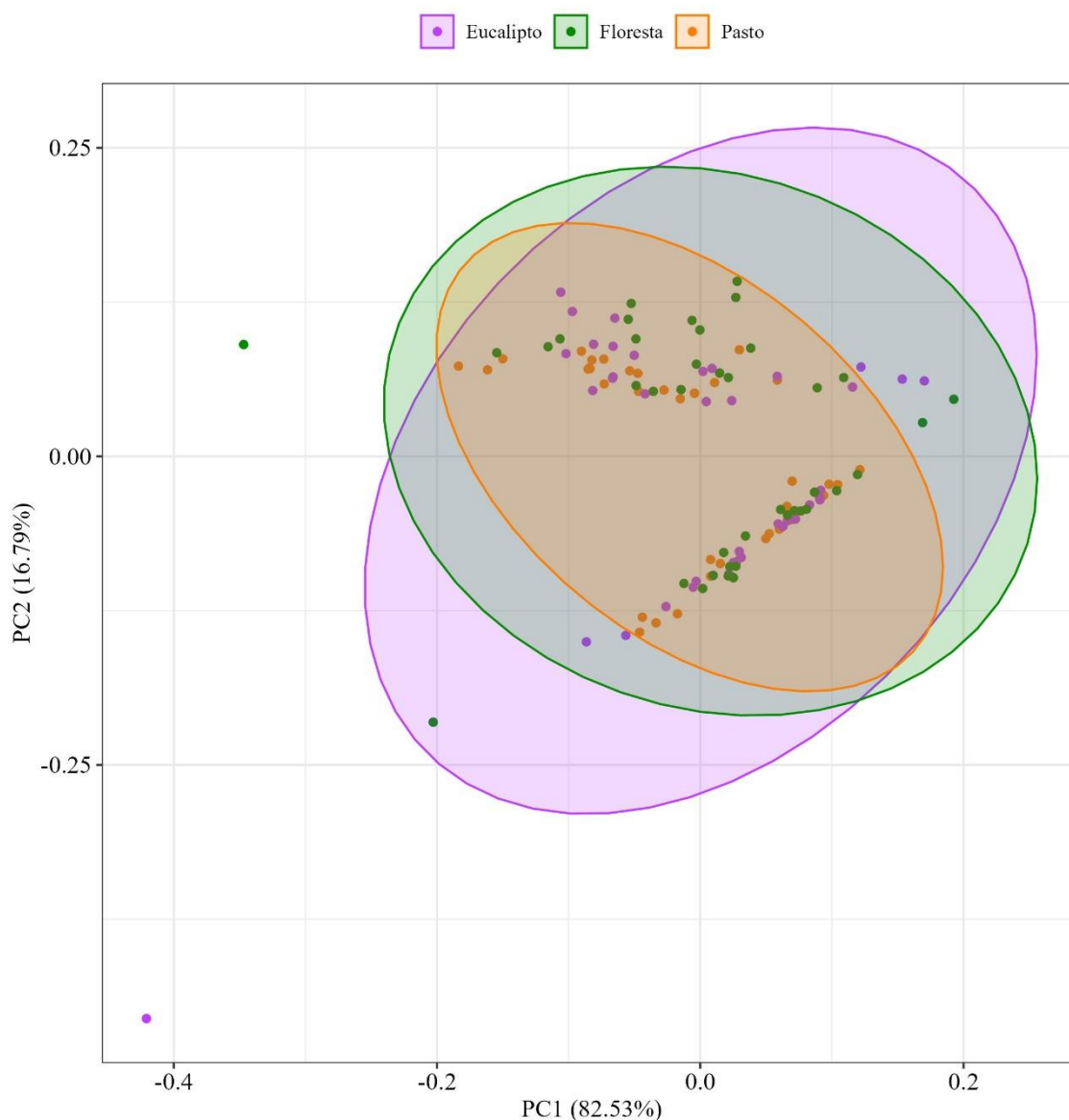


Figura 5. Análise de agrupamento utilizando o método de partição ao redor dos medoids (PAM) para atributos físicos e químicos do solo e o estoque de carbono do solo de diferentes usos do solo no município de Bujaru, estado do Pará.

Na camada de 0-10 cm, a pastagem apresentou o maior estoque de carbono, com 0,2997 Mg ha⁻¹, representando 29,97% do total, seguida pela floresta com 24,81% e o eucalipto com 22,17% (Tabela 2). Nas camadas mais profundas, como 10-20 cm e 20-40 cm, o eucalipto demonstrou maior estoque de carbono em comparação com a pastagem, destacando-se particularmente na camada de 20-40 cm, onde sua contribuição percentual foi de 34,68%, enquanto a pastagem apresentou uma contribuição bem menor. A floresta, por sua vez, apresentou uma distribuição mais equilibrada do estoque de carbono entre as diferentes camadas do solo, com maior contribuição na camada de 10-20 cm, que foi de 25,58% (Tabela 2).

Tabela 2. Distribuição percentual do estoque de carbono nas diferentes profundidades do solo (0 – 60 cm) sob três tipos de uso da terra: pastagem, plantio de eucalipto e floresta nativa.

Profundidade de coleta (cm)	Pasto (%)	Eucalipto (%)	Floresta (%)
0 - 10	29,97	22,17	24,81
10 - 20	23,17	20,17	25,58
20 - 40	27,78	34,68	25,83
40 - 60	19,07	22,98	23,78

4. Discussão

Os resultados indicam que todos os usos do solo apresentam acidez de média a elevada, baixos teores de nutrientes (P, K, Ca, Mg) e baixa saturação por bases (V), o que é típico de solos distróficos sob clima úmido e intenso intemperismo, como o Latossolo Amarelo da região (Sombroek, 1967; Moreira, Moraes e Fageria, 2012). A MO de maneira geral, se manteve em níveis "Baixo" em todas as camadas, refletindo a rápida ciclagem de nutrientes em ecossistemas tropicais, mesmo sob sistemas manejados (José e Minuzzi, 2020).

No eucalipto, embora tenha sido realizada calagem na dose recomendada, o solo ainda apresenta acidez média e baixa fertilidade. Esse resultado sugere a necessidade de reaplicação, possivelmente em função do esgotamento do efeito residual do corretivo (Mariño Macana *et al.*, 2020). A floresta secundária apresentou acidez mais elevada na superfície, possivelmente devido à decomposição de material vegetal acidificante. Já o pasto em pousio manteve padrão semelhante ao da floresta, indicando que a recuperação natural após anos de degradação ainda não foi suficiente para melhorar a fertilidade química do solo (Jansone, Wilpert e Hartmann, 2020; Van Der Sande *et al.*, 2022; Rego *et al.*, 2023). A melhoria da fertilidade do solo está diretamente associada ao crescimento e à produtividade da vegetação, uma vez que maior disponibilidade de nutrientes favorece a formação de biomassa aérea e radicular. Esse acúmulo de biomassa, por sua vez, contribui para o incremento do estoque de carbono, tanto na vegetação quanto no próprio solo, por meio do aporte contínuo de serapilheira e raízes em decomposição. Nesse sentido, sistemas mais férteis tendem a sustentar maior capacidade de sequestro de carbono, enquanto áreas degradadas ou com baixa fertilidade apresentam limitação na ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, menor acúmulo de carbono (Elbasian *et al.*, 2022; Oren *et al.*, 2001).

O estoque de carbono orgânico no solo (COS) é fundamental para a mitigação das mudanças climáticas, sendo influenciado na Amazônia por diferentes usos do solo e profundidades (Georgiou *et al.*, 2022a; Lal, 2018). Os resultados demonstraram que o estoque

de carbono orgânico no solo não apresentou diferença estatística significativa para a interação entre área e profundidade, nem para os fatores isolados. Isso corrobora a Hipótese, que previa a semelhança nos estoques de carbono orgânico entre floresta secundária, pastagem em pousio e plantio de eucalipto, especialmente nas camadas superficiais (0–30 cm).

Os valores de conteúdo de carbono orgânico do solo na camada de 0–10 cm em pastos em pousio (14,12 g kg⁻¹) e em plantios de eucalipto (11,12 g kg⁻¹) foram ligeiramente superiores aos intervalos previamente observados na literatura, de 9–10 g kg⁻¹ em pastos em pousio e 8–10 g kg⁻¹ em plantios de eucalipto com idade semelhante. Na camada de 40–60 cm, os valores observados neste estudo (4,35 g kg⁻¹ em pastagens e 5,03 g kg⁻¹ em plantios de eucalipto) encontram-se dentro da faixa reportada em trabalhos anteriores, que variam de 3 a 6 g kg⁻¹ para ambas as coberturas (Da Conceição *et al.*, 2011; de Moraes Rego *et al.*, 2023; dos Santos *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2009; Vicente *et al.*, 2019). Já na floresta, os valores observados permaneceram dentro dos intervalos esperados, com 11,86 g kg⁻¹ na camada superficial (0–10 cm) e 4,86 g kg⁻¹ na camada de 40–60 cm, consistentes com os intervalos reportados de 10–13 g kg⁻¹ e 4–7 g kg⁻¹, respectivamente (Desjardins *et al.*, 1994; Lopes *et al.*, 2009; Suárez *et al.*, 2024; Vicente *et al.*, 2019)

Diversos estudos indicam que a distribuição do COS e da densidade varia conforme o uso da terra e a profundidade do perfil. Em florestas nativas, o COS atinge entre 49,5 e 64,4 Mg ha⁻¹ até 1 m de profundidade, com maior concentração nos primeiros 10 cm (20–25 Mg ha⁻¹), decrescendo gradualmente em camadas mais profundas (10–20 Mg ha⁻¹ entre 30–100 cm), enquanto a densidade do solo situa-se em torno de 1,10 a 1,20 g cm⁻³ nas camadas superficiais (Desjardins *et al.*, 1994; dos Santos *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2016; Roberto *et al.*, 2018). Os resultados obtidos neste estudo corroboram parcialmente essa tendência, já que o COS na floresta variou de 17,0 Mg ha⁻¹ na camada de 0–10 cm para 14,9 Mg ha⁻¹ em 40–60 cm, confirmando a maior concentração de carbono nas camadas superficiais. A densidade aparente, por sua vez, foi de 1,51 g cm⁻³ (0–10 cm) para 1,71 g cm⁻³ (40–60 cm).

Em pastagens e áreas em pousio, a literatura aponta intervalos com acúmulo superficial de 15–20 Mg ha⁻¹ em 0–10 cm e densidade aparente de 1,30–1,40 g cm⁻³ (dos Santos *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2009; Roberto *et al.*, 2018). No estudo realizado em Bujaru, os valores observados foram de 22,8 Mg ha⁻¹ de COS na camada de 0–10 cm, reduzindo-se para 14,5 Mg ha⁻¹ em 40–60 cm, enquanto a densidade variou de 1,61 para 1,67 g cm⁻³ ao longo do perfil.

Para os plantios de eucalipto, estudos prévios apontam estoques de SOC entre 40 e 50 Mg ha⁻¹ nos 30 cm superficiais e densidade variando de 1,20 a 1,40 g cm⁻³ (Suárez *et al.*, 2024).

Enquanto o presente estudo apresentou intervalos com valores de 16,6 Mg ha⁻¹ (0–10 cm) e 21,1 Mg ha⁻¹ (20–40 cm), representando predominância do acúmulo nas camadas superficiais, e densidade aparente oscilando de 1,52 a 1,72 g cm⁻³ entre 0 e 40 cm.

As concentrações superficiais de carbono observadas em pastos e plantios de eucalipto, ligeiramente superiores aos intervalos previamente descritos na literatura, podem ser atribuídas ao uso prolongado e intensivo da terra, que possivelmente alterou a dinâmica do carbono no solo e retardou a recuperação integral de suas propriedades físicas. A ausência de diferenças estatísticas significativas entre as áreas analisadas sugere que as práticas de manejo adotadas podem estar resultando em estoques de carbono no solo semelhantes, mesmo em diferentes usos da terra (Conant *et al.*, 2017; Mayer *et al.*, 2020). Esses resultados indicam que, independentemente do uso atual da terra, o solo apresenta potencial para acumular carbono orgânico em níveis comparáveis aos de florestas secundárias, desde que sejam adotadas práticas de manejo que promovam cobertura vegetal contínua e aporte de matéria orgânica (Dignac *et al.*, 2017; Medeiros *et al.*, 2025). Somado a isso, em áreas tropicais, o pousio e a regeneração natural contribuem para restaurar parcialmente as perdas de carbono, o que pode explicar a equivalência com áreas de floresta secundária (Conant *et al.*, 2017; Medeiros *et al.*, 2025).

A análise individual das camadas do solo em relação à fertilidade e estoque de carbono revelou que o estoque de carbono é maior nas porções superficiais (0–10 cm), com declínio progressivo à medida que aumenta a profundidade. Isso possivelmente acontece devido à maior presença de matéria orgânica, atividade biológica intensa e maior aporte de resíduos vegetais na superfície (Poeplau *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022a).

Além disso, as correlações positivas entre estoque de carbono, carbono orgânico e nutrientes como cálcio e magnésio sugerem que a fertilidade do solo está intimamente ligada à capacidade de estocar carbono, especialmente nas camadas mais superficiais (Balesdent *et al.*, 2018; Gray *et al.*, 2015; Mantovani *et al.*, 2024). Nas camadas profundas (40 - 60 cm), observou-se maior densidade do solo e menores teores de matéria orgânica e fósforo, indicando ambientes menos favoráveis à decomposição e ao acúmulo de carbono recente (Byers *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022b, 2016). No entanto, o carbono armazenado em profundidade é considerado mais estável, o que pode representar um estoque importante a longo prazo, apesar de sua menor reatividade (Balesdent *et al.*, 2018; Byers *et al.*, 2023; Georgiou *et al.*, 2022a).

A distribuição percentual demonstrou que 50% do COS está nas camadas superficiais (0 – 30) independente do uso e cobertura do solo, confirmando a segunda hipótese do estudo. A pastagem, que se destaca nas camadas superficiais, demonstrou um forte acúmulo de carbono

nessa profundidade, mas com uma capacidade de sequestro significativamente menor nas camadas mais profundas. Isso reflete a maior atividade biológica e o aporte de matéria orgânica nas camadas rasas, favorecendo o acúmulo de carbono, enquanto as camadas mais profundas apresentam condições menos favoráveis à decomposição (Cuo *et al.*, 2025; Segnini *et al.*, 2019). Por outro lado, a floresta apresentou uma distribuição mais equilibrada de carbono ao longo das camadas do solo, com maior contribuição nas camadas intermediárias e profundas, sugerindo uma maior estabilidade e uma capacidade de sequestro a longo prazo, o que reflete a eficiência do ecossistema florestal em manter o carbono armazenado de forma constante (Alberto Quesada *et al.*, 2020).

O eucalipto, por sua vez, concentrou seu armazenamento especialmente nas camadas de 20-40 cm, indicando que sua estratégia de sequestro de carbono é voltada para o armazenamento profundo e mais estável. Esse comportamento também foi observado em plantios de *Eucalyptus urophylla* no Cerrado, onde observou-se um aumento aproximadamente 33,5% no estoque de carbono nas camadas de 20-40 cm em plantios de 8 anos, refletindo a tendência de acúmulo gradual de carbono nas camadas mais profundas à medida que o sistema radicular se desenvolve (Moraes *et al.*, 2024). Uma das explicações pode ser atribuída ao desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto, que à medida que envelhece, facilita o acúmulo de carbono em profundidades maiores, onde a decomposição é mais lenta e o carbono se mantém por mais tempo (Bacani *et al.*, 2024).

Assim, embora os valores similares entre os usos possam indicar um potencial de recuperação, eles também reforçam a necessidade de práticas sustentáveis e de longo prazo, sem implicar que o uso produtivo substitua ou iguale, em termos qualitativos e ecológicos, os serviços ecossistêmicos das florestas nativas.

4. Conclusão

- O conteúdo de carbono orgânico do solo permaneceu próximo aos valores descritos em estudos anteriores para a região, demonstrando compatibilidade com o padrão esperado para essas coberturas.
- A densidade do solo nas áreas de pastagem em pousio e de plantio de eucalipto com três anos apresentou valores ligeiramente superiores aos relatados na literatura, indicando que essas áreas ainda se encontram em condições físicas inadequadas, o que sugere que o solo não recuperou completamente sua estrutura.

- Os estoques de carbono orgânico dos solos ainda se mantêm em condições similares nas diferentes formas de uso ou cobertura do solo;
- Considerando o perfil dos solos nas três áreas estudadas é possível observar que aproximadamente 50 % do estoque total de carbono está concentrado nos primeiros 30 cm de profundidade, enquanto as camadas mais profundas contêm os outros 50 %, evidenciando a contribuição significativa das camadas mais profundas para o estoque total;
- A área de floresta secundária apresentou a distribuição mais equilibrada de carbono entre as camadas do solo;
- Conclui-se que a ausência de diferença significativa não significa que áreas de pasto, floresta e eucalipto apresentem características idênticas em relação ao sequestro de carbono e ao funcionamento ecológico; ao contrário, é fundamental considerar o tempo de recuperação, o histórico de uso da terra e as particularidades de cada ecossistema.

5. Referências

- Alberto Quesada, C., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Lawrence Phillips, O., Saiz, G., Lloyd, J., 2020. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *SOIL* 6, 53–88. <https://doi.org/10.5194/SOIL-6-53-2020>
- Alvarez V., Victor Hugo; Novais, Roberto Ferreira de; Barros, Nairam Félix de; Cantarutti, Reinaldo Bertola; Lopes, Alfredo Scheid. Interpretação dos Resultados das Análises de Solos. In: Ribeiro, Antonio Carlos; Guimarães, Paulo Tácito Gontijo; Alvarez V., Victor Hugo (eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.30–35.
- Azevedo, J.C. de, Cardoso, A. da S., Lage Filho, N.M., Faturi, C., Silva, T.C. da, Domingues, F.N., Costa, V.E., Ruggieri, A.C., Reis, R.A., do Rêgo, A.C., 2024. Effects of Agricultural Expansion on Soil Carbon and Nitrogen Stocks in the Amazon Deforestation Arc. *Soil Systems* 2024, Vol. 8, Page 25 8, 25. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS8010025>
- Bacani, V.M., Machado da Silva, B.H., Ayumi de Souza Amede Sato, A., Souza Sampaio, B.D., Rodrigues da Cunha, E., Pereira Vick, E., Ribeiro de Oliveira, V.F., Decco, H.F., 2024. Carbon storage and sequestration in a eucalyptus productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models. *J Clean Prod* 444, 141291. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141291>

- Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Chadoeuf, J., Cornu, S., Derrien, D., Fekiacova, Z., Hatté, C., 2018. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature* 559. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>
- Batjes, N.H., Dijkshoorn, J.A., 1999. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma* 89, 273–286. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00086-X)
- Byers, A.K., Garrett, L.G., Armstrong, C., Dean, F., Wakelin, S.A., 2023. Soil depth as a driver of microbial and carbon dynamics in a planted forest (*Pinus radiata*) pumice soil. *SOIL* 9. <https://doi.org/10.5194/soil-9-55-2023>
- Conant, R.T., Cerri, C.E.P., Osborne, B.B., Paustian, K., 2017. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications* 27, 662–668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>
- Cuo, M., Xu, L., Yuan, B., Nie, Y., Wei, J., 2025. Pastureland Soil Organic Carbon Storage Regulated by Pasture Species and Age Under Nitrogen and Water Addition in Northern China. *Agronomy* 2025, Vol. 15, Page 399 15, 399. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY15020399>
- Da Conceição, M.C.G., Matos, E.S., Bidone, E.D., Rodrigues, R.D.A.R., Cordeiro, R.C., 2011. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. *Agricultural Sciences* 8, 904–913. <https://doi.org/10.4236/as.2017.89066>
- de Araújo, R.M., da Silva, D.M.P., Campos, M.C.C., de Lima, A.F.L., Brito, W.B.M., Dos Santos, L.A.C., da Cunha, J.M., 2023. Spatial variability of organic carbon and soil carbon stock in pasture areas in União Bandeirantes, Rondônia. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 1013–1024. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V16.2.P1013-1024>
- de Moraes Rego, C.A.R., de Oliveira, P.S.R., Muniz, L.C., Rosset, J.S., Mattei, E., Costa, B.P., Pereira, M.G., da Silva, I.A.G., 2023. Pasture recovery and their impacts on the levels, stocks, and origin of carbon and nitrogen in plinthosol areas in the eastern Amazon. *Environ Earth Sci* 82, 1–11. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-11119-3/TABLES/7>
- de Oliveira, R.L.L., Gomes, M.F., Viana-Junior, A.B., Teixeira, W.G., Castellani, D.C., Kato, O.R., Vasconcelos, S.S., 2024. Oil palm agroforestry systems store more carbon and nitrogen in soil aggregates than monoculture in the Amazon. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 29, 1–21. <https://doi.org/10.1007/S11027-024-10166-W/METRICS>

- Desjardins, T., Andreux, F., Volkoff, B., Cerri, C.C., 1994. Organic carbon and ^{13}C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma* 61, 103–118. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90013-2)
- Dignac, M.F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G.T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.A., Nunan, N., Roumet, C., Basile-Doelsch, I., 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron Sustain Dev.* <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>
- dos Santos, C.C., Souza de Lima Ferraz Junior, A., Oliveira Sá, S., Andrés Muñoz Gutiérrez, J., Braun, H., Sarrazin, M., Brossard, M., Desjardins, T., 2018. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil. *Carbon Manag* 9, 655–664. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1530026>
- Durigan, M.R., Cherubin, M.R., de Camargo, P.B., Ferreira, J.N., Berenguer, E., Gardner, T.A., Barlow, J., Dias, C.T. dos S., Signor, D., de Oliveira, R.C., Cerri, C.E.P., 2017. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 379 9, 379. <https://doi.org/10.3390/SU9030379>
- Elbasiouny, H., El-Ramady, H., Elbehiry, F., Rajput, V., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2022). Plant Nutrition under Climate Change and Soil Carbon Sequestration. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14020914>.
- EMBRAPA; IBGE. Mapa de caracterização do Brasil. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2001. Elaborado pela Direção de Geociências do IBGE e pela Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos
- Ferreira Leite de Lima, A., César Costa Campos, M., Silva Martins, T., Abadia Silva, G., Benedito Mendes Brito, W., Antônio Coutrim dos Santos, L., Amorim de Oliveira, I., Maurício da Cunha, J., 2022. Soil chemical attributes in areas under conversion from forest to pasture in southern Brazilian Amazon. *Scientific Reports* | 12, 22555. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25406-9>
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., Rumpel, C., 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 450, 277–280. <https://doi.org/10.1038/NATURE06275;KWRD=SCIENCE>

- Fujisaki, K., Perrin, A.S., Desjardins, T., Bernoux, M., Balbino, L.C., Brossard, M., 2015. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Glob Chang Biol* 21, 2773–2786. <https://doi.org/10.1111/GCB.12906>
- Georgiou, K., Jackson, R.B., Vindušková, O., Abramoff, R.Z., Ahlström, A., Feng, W., Harden, J.W., Pellegrini, A.F.A., Polley, H.W., Soong, J.L., Riley, W.J., Torn, M.S., 2022a. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nat Commun* 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>
- Georgiou, K., Jackson, R.B., Vindušková, O., Abramoff, R.Z., Ahlström, A., Feng, W., Harden, J.W., Pellegrini, A.F.A., Polley, H.W., Soong, J.L., Riley, W.J., Torn, M.S., 2022b. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications* 2022 13:1 13, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>
- Gray, J.M., Bishop, T.F.A., Wilson, B.R., 2015. Factors Controlling Soil Organic Carbon Stocks with Depth in Eastern Australia. *Soil Science Society of America Journal* 79. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.06.0224>
- Gross, C.D., Harrison, R.B., 2019. The Case for Digging Deeper: Soil Organic Carbon Storage, Dynamics, and Controls in Our Changing World. *Soil Systems* 2019, Vol. 3, Page 28 3, 28. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS3020028>
- Heinrich, V.H.A., Dalagnol, R., Cassol, H.L.G., Rosan, T.M., de Almeida, C.T., Silva Junior, C.H.L., Campanharo, W.A., House, J.I., Sitch, S., Hales, T.C., Adami, M., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.C., 2021. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nature Communications* 2021 12:1 12, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>
- Huang, B., Zhang, L., Cao, Y., Yang, Y., Wang, P., Li, Z., Lin, Y., 2023. Effects of land-use type on soil organic carbon and carbon pool management index through arbuscular mycorrhizal fungi pathways. *Glob Ecol Conserv* 43, e02432. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2023.E02432>
- Jansone, L., Wilpert, K., & Hartmann, P. (2020). Natural recovery and liming effects in acidified forest soils in SW-Germany. *Soil Systems*, 4(3), 38. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4030038>

- José, M., & Minuzzi, R. (2020). Desempenho na estimativa de precipitação pelo radar meteorológico do oeste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(6), 2249–2258. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V12.6.P2249-2258>
- Lal, R., 2018. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Glob Chang Biol*. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Lê, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*. J. of Statistical Software 25.
- Li, B. Bin, Li, P.P., Yang, X.M., Xiao, H.B., Xu, M.X., Liu, G. Bin, 2021. Land-use conversion changes deep soil organic carbon stock in the Chinese Loess Plateau. *Land Degrad Dev* 32, 505–517. <https://doi.org/10.1002/LDR.3644>
- Lopes, M., Júnior, S., Desjardins, T., Sarrazin, M., Silva De Melo, V., Fernando, P., Martins, S., Santos, E.R., Reis De Carvalho, C.J., 2009. Carbon Content In Amazonian Oxisols After Forest Conversion To Pasture (1). *PASTURE 1603 R. Bras. Ci. Solo* 33, 1603–1611.
- Maechler Martin, Rousseeuw Peter, Struyf Anja, Hubert Mia, Hornik Kurt, Studer Matthias, Roudier Pierre, Gonzalez Juan, Schubert Erich, Kozłowski Kamil, 2025. *Cluster Analysis Basics and Extensions*.
- Malhi, Y., Gatti, L., Melack, J., Ometto, J., Kesselmeier, J., Wolff, S., Aragão, L., Costa, M., Saleska, S., Pangala, S., Basso, L., Rizzo, L., Araújo, A., Restrepo Coupe, N., Silva Junior, C., 2021. Chapter 6: Biogeochemical cycles in the Amazon. *Biogeochemical Cycles in the Amazon* 121–150. <https://doi.org/https://doi.org/10.55161/TAKR3454>
- Mantovani, V.A., Terra, M. de C.N.S., Rodrigues, A.F., Silva, C.A., Guo, L., de Mello, J.M., de Mello, C.R., 2024. Unprecedentedly high soil carbon stocks and their spatial variability in a seasonally dry Atlantic Forest in Brazil. *Catena (Amst)* 235, 107696. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.107696>
- Mariño Macana, Y.A., de Toledo, F.H.S.F., de Vicente Ferraz, A. *et al.* Soil fertility and fine root distribution after gypsum application in Eucalyptus plantations with different tolerance to water deficit. *New Forests* 51, 1039–1054 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09773-7>

- Marques, J.D. de O., Luizão, F.J., Teixeira, W.G., Vitel, C.M., Marques, E.M. de A., 2016. Soil Organic Carbon, Carbon Stock And Their Relationships To Physical Attributes Under Forest Soils In Central Amazonia 197–208. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200002>
- Mayer, M., Prescott, C.E., Abaker, W.E.A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G.W.D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J.A., Vanguelova, E.I., Vesterdal, L., 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *For Ecol Manage* 466, 118127. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2020.118127>
- Medeiros, A. de S., Cesário, F.V., Santos, T.C. dos, Ferreira Maia, S.M., 2025. Differences in the storage of soil organic carbon in Brazil's agricultural land: A meta-analysis. *Catena (Amst)* 249, 108680. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2024.108680>
- Melo, V.S., Desjardins, T., Silva, J.L., Santos, E.R., Sarrazin, M., Santos, M.M.L.S., 2012. Consequences of forest conversion to pasture and fallow on soil microbial biomass and activity in the eastern Amazon. *Soil Use Manag* 28, 530–535. <https://doi.org/10.1111/SUM.12003;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Mir, Y.H., Ganie, M.A., Shah, T.I., Aezum, A.M., Bangroo, S.A., Mir, S.A., Dar, S.R., Mahdi, S.S., Baba, Z.A., Shah, A.M., Majeed, U., Minkina, T., Rajput, V.D., Dar, A.A., 2023. Soil organic carbon pools and carbon management index under different land use systems in North western Himalayas. *PeerJ* 11, e15266. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.15266/SUPP-1>
- Moraes, J.L., Cerri, C.C., Melillo, J.M., Kicklighter, D., Neill, C., Skole, D.L., Steudler, P.A., 1995. Soil Carbon Stocks of the Brazilian Amazon Basin. *Soil Science Society of America Journal* 59. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900010038x>
- Moraes, W. dos S., Dionisio, L.F.S., Schwartz, G., Pereira, J.A., Damascena, J.F., Rizzo, F.A., Neto, A.B.B., de Almeida Milhomem, C., Alves, J.M.A., Araujo Filho, R.N., de Almeida Sarmiento, R., da Silva, A., Moraes, C.B. de, 2024. Carbon and nitrogen, humic and labile fractions in soil under clonal eucalyptus stands from cerrado. *Eur J For Res* 143, 971–984. <https://doi.org/10.1007/S10342-024-01669-X/FIGURES/9>
- Morales, M.M., Tonini, H., Behling, M., Hoshide, A.K., 2023. Eucalyptus Carbon Stock Research in an Integrated Livestock-Forestry System in Brazil. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7750 15, 7750. <https://doi.org/10.3390/SU15107750>

- Moreira, A., Moraes, L., & Fageria, N. (2012). Nutritional limitations in multi-strata agroforestry system with native Amazonian plants. *Journal of Plant Nutrition*, 35(11), 1791–1805. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.706676>
- Odebiri, O., Mutanga, O., Odindi, J., Slotow, R., Mafongoya, P., Lottering, R., Naicker, R., Nyasha Matongera, T., Mngadi, M., 2024. Remote sensing of depth-induced variations in soil organic carbon stocks distribution within different vegetated landscapes. *Catena (Amst)* 243, 108216. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2024.108216>
- Oren, R., Ellsworth, D., Johnsen, K., Phillips, N., Ewers, B., Maier, C., Schäfer, K., McCarthy, H., Hendrey, G., McNulty, S., & Katul, G. (2001). Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. *Nature*, 411, 469-472. <https://doi.org/10.1038/35078064>.
- Poeplau, C., Jacobs, A., Don, A., Vos, C., Schneider, F., Wittnebel, M., Tiemeyer, B., Heidkamp, A., Prietz, R., Flessa, H., 2020. Stocks of organic carbon in German agricultural soils—Key results of the first comprehensive inventory. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 183, 665–681. <https://doi.org/10.1002/JPLN.202000113>;WEBSITE:WEBSITE:PERICLES;JOURNAL:JOURNAL:15222624C;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T.M., Almeyda Zambrano, A.M., Balvanera, P., Becknell, J.M., Boukili, V., Brancalion, P.H.S., Broadbent, E.N., Chazdon, R.L., Craven, D., De Almeida-Cortez, J.S., Cabral, G.A.L., De Jong, B.H.J., Denslow, J.S., Dent, D.H., DeWalt, S.J., Dupuy, J.M., Durán, S.M., Espírito-Santo, M.M., Fandino, M.C., César, R.G., Hall, J.S., Hernandez-Stefanoni, J.L., Jakovac, C.C., Junqueira, A.B., Kennard, D., Letcher, S.G., Licona, J.C., Lohbeck, M., Marín-Spiotta, E., Martínez-Ramos, M., Massoca, P., Meave, J.A., Mesquita, R., Mora, F., Munõz, R., Muscarella, R., Nunes, Y.R.F., Ochoa-Gaona, S., De Oliveira, A.A., Orihuela-Belmonte, E., Penã-Claros, M., Pérez-García, E.A., Piotto, D., Powers, J.S., Rodríguez-Velázquez, J., Romero-Pérez, I.E., Ruíz, J., Saldarriaga, J.G., Sanchez-Azofeifa, A., Schwartz, N.B., Steininger, M.K., Swenson, N.G., Toledo, M., Uriarte, M., Van Breugel, M., Van Der Wal, H., Veloso, M.D.M., Vester, H.F.M., Vicentini, A., Vieira, I.C.G., Bentos, T.V., Williamson, G.B., Rozendaal, D.M.A., 2016. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* 530, 211–214. <https://doi.org/10.1038/NATURE16512>;SUBJMETA=158,2445,2454,2458,631,704;KWRD=ECOSYSTEM+ECOLOGY,ECOSYSTEM+SERVICES,FOREST+ECOLOGY

Qin, C., Li, S.L., Yu, G.H., Bass, A.M., Yue, F.J., Xu, S., 2022. Vertical variations of soil carbon under different land uses in a karst critical zone observatory (CZO), SW China. *Geoderma* 412, 115741. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2022.115741>

R Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rego, C., De Oliveira, P., Rosset, J., Muniz, L., Mattei, E., Reis, V., Costa, B., & Neto, W. (2023). Carbon, nitrogen, and physical fractions of organic matter in recovered pastures of the Maranhense Amazon. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 45(1), e60794. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.60794>

Ribeiro, F.P.; Gatto, A.; Oliveira, A.D.D.; Pulrolnik, K.; Valadão, M.B.X.; Araújo, J.B.C.N.; Carvalho,.; Ferreira, E.A.B., Ribeiro, F.P., Gatto, Alcides, Duarte De Oliveira, A., Pulrolnik, Karina, Bruno, M., Valadão, X., Baldan Costa, J., Araújo, N., Moreira De Carvalho, A., Aparecida, E., Ferreira, B., 2023. Carbon Storage in Different Compartments in Eucalyptus Stands and Native Cerrado Vegetation. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 2751 12, 2751. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12142751>

Roberto, V., Reis, R., Deon, D.S., Cavalcante Muniz, L., Barros E Silva, M., Rocha, C.A., Rego, M., Serra Garcia, U., South De Lima Cantanhêde, I., Bezerra Costa, J., 2018. Carbon Stocks and Soil Organic Matter Quality Under Different of Land Uses in the Maranhense Amazon. *Journal of Agricultural Science* 10, p329. <https://doi.org/10.5539/JAS.V10N5P329>

Rodrigues, T.E., Santos, P.L. dos, Silva, J.M.L. da, Valente, M.A., Santos, E. da S., Rolim, P.A.M., 2003. Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Bujaru, Estado do Pará. Belém.

Salazar, R., Alegre, J., Pizarro, D., Duff, A.J., García, C., Gómez, C., 2024. Soil carbon stock potential in pastoral and silvopastoral systems in the Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems* 98. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00969-w>

Segnini, A., Xavier, A.A.P., Otaviani-Junior, P.L., Oliveira, P.P.A., Pedroso, A. de F., Praes, M.F.F.M., Rodrigues, P.H.M., Milori, D.M.B.P., 2019. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. *Sci Agric* 76, 33–40. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0131>

Silva, G.C. da, Vasconcelos, C.A.L., Fonseca, H.B., 2016. ECOTORISMO OS ATRATIVOS NATURAIS EM BUJARU/PARÁ. Revista Margens Interdisciplinar 7. <https://doi.org/10.18542/rmi.v7i9.2781>

Soares, M.D.R., Campos, M.C.C., Da Cunha, J.M., De Souza, Z.M., De Oliveira, I.A., De Aquino, R.E., Mantovanelli, B.C., Oliveira, L.S., 2018. Spatial variability of physical attributes and soil aggregates in archaeological dark dirt under pasture. Revista Ambiente & Água 13, e2002. <https://doi.org/10.4136/AMBI-AGUA.2002>

Sombroek, W. (1967). *Amazon soils: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation. <https://doi.org/10.2307/1794534>

Soucémariadin, L.N., Cécillon, L., Guenet, B., Chenu, C., Baudin, F., Nicolas, M., Girardin, C., Barré, P., 2018. Environmental factors controlling soil organic carbon stability in French forest soils. Plant Soil 426, 267–286. <https://doi.org/10.1007/S11104-018-3613-X/METRICS>

Souza, A.S. de, Kato, O.R., Freitas, L. de S., Galvão, J.R., 2023. Estoque de carbono em frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de uso na Amazônia oriental. Research, Society and Development 12, e0212440330. <https://doi.org/10.33448/RSD-V12I4.40330>

Souza, L.F.T., Hirmas, D.R., Sullivan, P.L., Reuman, D.C., Kirk, M.F., Li, L., Ajami, H., Wen, H., Sarto, M.V.M., Loecke, T.D., Rudick, A.K., Rice, C.W., Billings, S.A., 2023. Root distributions, precipitation, and soil structure converge to govern soil organic carbon depth distributions. Geoderma 437, 116569. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116569>

Suárez, J.C., Segura, M., Andrade, H.J., 2024. Agroforestry systems affect soil organic carbon stocks and fractions in deforested landscapes of Amazonia. Agroforestry Systems 98, 1139–1151. <https://doi.org/10.1007/S10457-023-00949-6/FIGURES/4>

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. Manual de métodos de análise de solo, Embrapa.

Van Der Sande, M., Powers, J., Kuyper, T., Norden, N., Salgado-Negret, B., De Almeida, J., Bongers, F., Delgado, D., Dent, D., Derroire, G., Santo, M., Dupuy, J., Fernandes, G., Finegan, B., Gavito, M., Hernández-Stefanoni, J., Jakovac, C., Jones, I., Veloso, M., Meave, J., Mora, F., Muñoz, R., Pérez-Cárdenas, N., Piotto, D., Alvarez-Davila, E., Cáceres-Siani, Y., Dalban-Pilon,

- C., Dourdain, A., Du, D., Villalobos, D., Nunes, Y., Sánchez-Azofeifa, A., & Poorter, L. (2022). Soil resistance and recovery during neotropical forest succession. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1856), 20210074. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0074>
- Veldkamp, E., Schmidt, M., Powers, J.S., Corre, M.D., 2020. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nat Rev Earth Environ*. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0091-5>
- Vicente, L.C., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., 2019. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. *Catena (Amst)* 182, 104139. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104139>
- Wang, M., Guo, X., Zhang, S., Xiao, L., Mishra, U., Yang, Y., Zhu, B., Wang, G., Mao, X., Qian, T., Jiang, T., Shi, Z., Luo, Z., 2022a. Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate. *Nat Commun* 13, 1–11. <https://doi.org/10.1038/S41467-022-33278>
- Wang, M., Guo, X., Zhang, S., Xiao, L., Mishra, U., Yang, Y., Zhu, B., Wang, G., Mao, X., Qian, T., Jiang, T., Shi, Z., Luo, Z., 2022b. Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate. *Nat Commun* 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33278-w>
- Wang, Y., Han, X., Jin, Z., Zhang, C., Fang, L., 2016. Soil Organic Carbon Stocks in Deep Soils at a Watershed Scale on the Chinese Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal* 80. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.06.0220>
- Zhang, Y., Zou, C., Ding, L., -, al, Zhang, Q., Xia, W., Ding, Y., Guo, Z., Li, J., Shi, C., Wang, H., 2019. Evolution characteristics of soil carbon density after homestead remediation. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 300, 022167. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/2/022167>
- Zhao, Zhizhong, Zhao, Zeyang, Fu, B., Wang, J., Tang, W., 2021. Characteristics of soil organic carbon fractions under different land use patterns in a tropical area. *J Soils Sediments* 21, 689–697. <https://doi.org/10.1007/S11368-020-02809-7/METRICS>

APÊNDICE A - Classificação dos atributos químicos do solo para diferentes usos da terra (Eucalipto, Floresta e Pasto) em diferentes camadas no município de Bujaru, estado do Pará.

CAMADAS	pH	CO	MO	P	K	Ca	Mg	Al ³⁺	H+Al	SB	T	V	m
cm	H ₂ O	dag/kg		mg dm ⁻³				cmolc dm ⁻³				%	
EUCALIPTO													
0-10	4,51	1,11	1,92	2,06	8,54	0,24	0,11	0,52	6,33	0,37	6,70	5,60	59,45
10-20	4,60	0,91	1,57	1,08	5,44	0,17	0,09	0,48	5,35	0,27	5,62	4,67	65,82
20-40	4,70	0,75	1,30	0,13	4,21	0,23	0,03	0,38	3,83	0,27	4,10	7,19	58,94
40-60	4,81	0,50	0,87	0,05	6,30	0,32	0,02	0,32	3,71	0,36	4,07	8,97	49,98
FLORESTA													
0-10	4,40	1,19	2,04	1,96	15,54	0,63	0,10	0,62	6,20	0,78	6,98	11,10	47,29
10-20	4,47	1,11	1,91	1,81	16,46	0,42	0,05	0,71	5,62	0,51	6,13	8,28	60,35
20-40	4,62	0,53	0,91	0,26	6,63	0,28	0,05	0,77	4,74	0,34	5,09	7,13	67,93
40-60	4,64	0,49	0,84	0,12	7,03	0,26	0,05	0,76	4,52	0,33	4,85	6,96	68,60
PASTO													
0-10	5,40	1,41	2,43	2,35	11,32	0,29	0,18	0,74	6,09	0,50	6,58	7,64	58,92
10-20	5,36	1,04	1,80	1,89	7,04	0,21	0,14	0,78	5,74	0,37	6,10	6,00	67,41
20-40	5,33	0,61	1,05	0,63	6,54	0,23	0,11	0,61	4,34	0,36	4,70	7,82	60,33
40-60	5,38	0,44	0,75	0,88	8,19	0,30	0,07	0,51	4,02	0,39	4,42	9,18	55,13

Fonte: SOUZA, Adrielly Costa. Estoque de carbono orgânico no solo sob diferentes usos da terra na Amazônia Oriental. Orientador: Gracialda Costa Ferreira. 2025. 39 f. Dissertação (Dissertação em Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2025.