ReGeo ISSN: 2177-3246

MOSAICOS PEDOGEOQUÍMICOS E ORGANIZAÇÃO ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO EM CASTANHAIS NATURAIS DA AMAZÔNIA NO ESTADO DO AMAPÁ

SOIL SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL AND PHYSICAL SOIL ATTRIBUTES IN THREE BRAZIL NUT STANDS IN THE STATE OF AMAPÁ, BRAZILIAN AMAZON

MOSAICOS PEDOGEOQUÍMICOS Y ORGANIZACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN CASTAÑALES NATURALES DE LA AMAZONIA EN EL ESTADO DE AMAPÁ

https://doi.org/10.56238/revgeov17n9-200

Data de submissão: 16/08/2026 **Data de publicação:** 30/09/2026

Raimundo Cosme de Oliveira Junior
Doutor em Geologia e Geoquímica
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

Marcelino Carneiro Guedes
Doutor em Recursos Florestais
Instituição: Embrapa Amapá
E-mail: marcelino.guedes@embrapa.br

Darlisson Bentes dos Santos
Mestre em Energia na Agricultura
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: engenheirodbs@hotmail.com

Nagib Jorge Melem Junior
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amapá
E-mail: nagib.melem@embrapa.br

Patricia da Costa
Doutora em Biodiversidade e Conservação
Instituição: Embrapa Meio Ambiente
E-mail: patricia.da-costa@embrapa.br

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

Carlos Alberto Costa Veloso
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: carlos.veloso@embrapa.br

RESUMO
A fertilidade dos solos amazônicos apresenta elevada variabilidade espacial resultante da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos que atuam em múltiplas escalas na paisagem. Em castanhais naturais da Amazônia, essa heterogeneidade edáfica pode influenciar simultaneamente a disponibilidade de nutrientes, a retenção de água no solo e o funcionamento ecofisiológico das árvores. Neste estudo, avaliou-se a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo em três áreas de castanhal no estado do Amapá, utilizando técnicas geoestatísticas para identificar padrões de dependência espacial e representar a distribuição da fertilidade do solo. Foram analisados atributos relacionados à acidez do solo, capacidade de troca catiônica, fósforo disponível e fração argila. A estrutura espacial foi investigada por meio de variogramas experimentais ajustados a modelos teóricos, e a interpolação espacial foi realizada por krigagem ordinária. Os resultados indicaram predominância de dependência espacial moderada a forte, evidenciando que a fertilidade do solo se organiza em mosaicos edáficos intra-área. A consistência dos padrões espaciais entre as áreas sugere a atuação de controles pedogenéticos regionais, enquanto a variabilidade de atributos como fósforo e argila reflete processos locais associados à ciclagem biogeoquímica. A integração entre os resultados geoestatísticos e a interpretação ecofisiológica indica que a heterogeneidade espacial do solo pode influenciar a disponibilidade hídrica e o funcionamento hidráulico da castanheira-da-amazônia (Bertholletia excelsa), com potenciais implicações para o crescimento e a produtividade da espécie. Assim, o estudo demonstra que abordagens espacialmente explícitas são fundamentais para compreender a dinâmica de solos e vegetação em ecossistemas florestais tropicais.

Palavras-chave: Geoestatística do Solo. Fertilidade do Solo. Mosaicos Edáficos. Castanheira-da-amazônia. Funcionamento Hidráulico. Amazônia.

ABSTRACT
Amazonian soils exhibit strong spatial variability driven by the interaction of pedogenetic, hydrological, and biogeochemical processes operating across multiple landscape scales. In natural Brazil nut stands, this edaphic heterogeneity may simultaneously influence nutrient availability, soil water retention, and tree eco-physiological functioning. This study evaluated the spatial variability of chemical and physical soil attributes in three Brazil nut (Bertholletia excelsa) stands in the state of Amapá, Brazilian Amazon, using geostatistical techniques to identify spatial dependence patterns and map soil fertility distribution. Soil attributes related to acidity, cation exchange capacity, available phosphorus, and clay content were analyzed. Spatial structure was assessed using experimental variograms fitted to theoretical models, and spatial interpolation was performed by ordinary kriging. Results revealed a predominance of moderate to strong spatial dependence, indicating that soil fertility is organized into edaphic mosaics within the studied areas. The consistency of spatial patterns among sites suggests the influence of regional pedogenetic controls, whereas the variability of phosphorus and clay reflects local biogeochemical processes. Integrating geostatistical results with eco-physiological interpretation indicates that soil spatial heterogeneity may regulate water availability and hydraulic functioning of Brazil nut trees, with potential implications for growth and productivity. These findings highlight the importance of spatially explicit approaches for understanding soil–plant interactions in tropical forest ecosystems.

Keywords: Soil Geostatistics. Soil Fertility. Edaphic Mosaics. Brazil Nut Tree. Hydraulic Functioning. Amazon.

RESUMEN
La fertilidad de los suelos amazónicos presenta elevada variabilidad espacial resultante de la interacción entre procesos pedogenéticos, hidrológicos y biogeoquímicos que actúan en múltiples

escalas en el paisaje. En castañales naturales de la Amazonía, esta heterogeneidad edáfica puede influenciar simultáneamente la disponibilidad de nutrientes, la retención de agua en el suelo y el funcionamiento ecofisiológico de los árboles. En este estudio, se evaluó la variabilidad espacial de atributos químicos y físicos del suelo en tres áreas de castañal en el estado de Amapá, utilizando técnicas geoestadísticas para identificar patrones de dependencia espacial y representar la distribución de la fertilidad del suelo. Se analizaron atributos relacionados con la acidez del suelo, capacidad de intercambio catiónico, fósforo disponible y fracción arcilla. La estructura espacial fue investigada por medio de variogramas experimentales ajustados a modelos teóricos, y la interpolación espacial fue realizada por kriging ordinario. Los resultados indicaron predominancia de dependencia espacial moderada a fuerte, evidenciando que la fertilidad del suelo se organiza en mosaicos edáficos intra-área. La consistencia de los patrones espaciales entre las áreas sugiere la actuación de controles pedogenéticos regionales, mientras que la variabilidad de atributos como fósforo y arcilla refleja procesos locales asociados con el ciclaje biogeoquímico. La integración entre los resultados geoestadísticos y la interpretación ecofisiológica indica que la heterogeneidad espacial del suelo puede influenciar la disponibilidad hídrica y el funcionamiento hidráulico de la castaña amazónica (Bertholletia excelsa), con potenciales implicaciones para el crecimiento y la productividad de la especie. Así, el estudio demuestra que los enfoques espacialmente explícitos son fundamentales para comprender la dinámica de suelos y vegetación en ecosistemas forestales tropicales.

Palabras clave: Geoestadística del Suelo. Fertilidad del Suelo. Mosaicos Edáficos. Castaña Amazónica. Funcionamiento Hidráulico. Amazonía.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia constitui o maior sistema contínuo de florestas tropicais do planeta, desempenhando papel fundamental na regulação do clima global, na manutenção da biodiversidade e no funcionamento dos ciclos biogeoquímicos do carbono, nitrogênio e fósforo. Apesar da elevada produtividade primária, a maior parte dos solos amazônicos apresenta baixa fertilidade natural, resultado de intensos processos de intemperismo químico e lixiviação ao longo de escalas geológicas (Quesada *et al.*, 2020). Esses processos promovem a remoção de cátions básicos, o enriquecimento relativo de óxidos de ferro e alumínio e a formação de solos altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, baixa saturação por bases e limitada capacidade de troca catiônica (Souza *et al.*, 2018; Quesada *et al.*, 2010).

Nessas condições, a fertilidade dos solos amazônicos depende fortemente da dinâmica da matéria orgânica e da formação de complexos organominerais, responsáveis pela retenção de nutrientes e pela modulação da reatividade química do solo (Ramalho *et al.*, 2025; Kirsten *et al.*, 2021). Pequenas variações na textura, mineralogia ou conteúdo de matéria orgânica podem resultar em diferenças significativas na disponibilidade de nutrientes e na capacidade de retenção hídrica, tornando a heterogeneidade espacial dos atributos do solo um fator-chave na organização funcional desses ecossistemas (Kirsten *et al.*, 2021).

Além dos controles químicos, as propriedades físicas do solo exercem papel central na dinâmica hidrológica. A fração argilosa e a capacidade de troca catiônica estão associadas à retenção de água e à estabilidade estrutural, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica para a vegetação (Lambooy, 1984; Botha & Eisenberg, 1993). Em florestas tropicais, onde a produtividade depende da manutenção do fluxo contínuo de água no sistema solo–planta–atmosfera, essas propriedades podem modular o funcionamento ecofisiológico das árvores (Binks *et al.*, 2022; Fujii *et al.*, 2018).

Entre as espécies de maior relevância ecológica e socioeconômica da Amazônia destaca-se a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*), uma espécie emergente amplamente distribuída em florestas de terra firme. Além de sua importância econômica, a espécie desempenha papel estrutural na dinâmica florestal (Scoles & Gribel, 2011; ter Steege *et al.*, 2013). Estudos dendroecológicos demonstram que seu crescimento radial é altamente sensível à disponibilidade de água no solo, especialmente durante a estação seca (Andrade *et al.*, 2024; Caetano Andrade *et al.*, 2019), evidenciando forte dependência do funcionamento hidráulico do sistema solo–planta.

Nesse contexto, propriedades do solo que influenciam simultaneamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes podem desempenhar papel decisivo na regulação do crescimento e da

produtividade da espécie (Oliveira *et al.*, 2024). A variabilidade espacial desses atributos pode gerar gradientes de disponibilidade hídrica e nutricional em escala local, influenciando o desempenho fisiológico das árvores.

Apesar dessa relevância, ainda são escassos os estudos que investigam a variabilidade espacial da fertilidade do solo em castanhais naturais, particularmente sob uma abordagem geoestatística integrada a processos ecofisiológicos (Silva *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2017). Em especial, permanece pouco compreendida a forma como os atributos do solo se organizam espacialmente nesses sistemas e como essa organização influencia o funcionamento hidráulico e o crescimento das árvores (Pereira *et al.*, 2019). Essa lacuna é particularmente evidente no estado do Amapá, onde estudos geoestatísticos em castanhais naturais ainda são incipientes.

Técnicas geoestatísticas têm sido amplamente utilizadas para investigar a estrutura espacial de atributos do solo, permitindo identificar padrões de autocorrelação e representar sua distribuição contínua na paisagem (Cambardella *et al.*, 1994; Vasques *et al.*, 2016). A análise variográfica e a krigagem possibilitam a identificação de mosaicos edáficos resultantes da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e ecológicos (Ho *et al.*, 2025).

Em florestas tropicais, a heterogeneidade ambiental ocorre em múltiplas escalas e pode influenciar diretamente a dinâmica da vegetação (Raupp & Cintra, 2010). Gradientes espaciais de textura, acidez e nutrientes podem modificar simultaneamente a retenção de água e a disponibilidade de recursos, criando condições diferenciadas para o funcionamento ecofisiológico das árvores (Gomes & Ponte, 2025).

Assim, compreender a estrutura espacial da fertilidade do solo em castanhais amazônicos representa um passo fundamental para integrar processos pedológicos, hidrológicos e ecofisiológicos na interpretação da dinâmica desses ecossistemas (Silva *et al.*, 2022). A análise geoestatística pode revelar padrões que ajudam a explicar diferenças locais no crescimento e na produtividade das árvores (Staudhammer *et al.*, 2021).

Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo em três áreas de castanhal no estado do Amapá, utilizando técnicas geoestatísticas para identificar padrões de dependência espacial e mapear a distribuição da fertilidade do solo. A hipótese central é que os atributos edáficos apresentam estrutura espacial organizada, refletindo a atuação conjunta de processos pedogenéticos e hidrológicos, e que essa organização pode influenciar a retenção de água no solo, a disponibilidade de nutrientes e o funcionamento ecofisiológico da castanheira.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

No Estado do Amapá, os dados foram coletados na Reserva Extrativista do Rio Cajari (Resex Cajari), que é uma Unidade de Conservação brasileira de uso sustentável da natureza, criada por meio do Decreto n° 9.145 de 12 de março de 1990. Estão localizadas nos municípios de Laranjal do Jari e Mazagão, entre as coordenadas 0° 15' S e 52° 25' W; 1° 5' S e 51° 31' W.

Para a realização deste trabalho, o levantamento foi realizado no Alto Cajari. Essa região é caracterizada pela presença de agregados de castanheiras nativas, denominados castanhais. Esses são distribuídos ao longo de áreas de terra firme (330.698 ha), que representa cerca de 65,6% da área total da reserva, em torno de 502 mil hectares (FUNI, 2009). Nessas áreas de terra firme, há vastas extensões de ambientes florestais, aqui denominado "floresta", e também de transição entre floresta e vegetação característica de cerrado, aqui denominadas como "transição cerrado/floresta".

Em cada ambiente foi avaliado o solo em duas parcelas permanentes de 9 ha cada, instaladas para estudos da rede Kamukaia seguindo recomendações de Guedes *et al.* (2017). Os três castanhais estão localizados nas seguintes coordenadas, municípios e tipologias florestais:

- 0°33'42.84" S e 52°18'19.31" W (Cláudio); Laranjal do Jari, floresta.
- 0°25'21.18" S e 51°57'52.72" W (K7); 0°19'19.48" S e 51°56'29.29" W (Miguel); Mazagão, transição cerrado/floresta.

Essa região onde ocorrem os castanhais e as tipologias florestais e de savana, é caracterizada por um clima estabelecido na transição de clima tropical de savana (Aw) para tropical de monção (Am), segundo a classificação de Köppen. Anualmente, a média de temperatura fica em torno de 25°C, com máxima de 31,5°C e mínima de 18°C. A precipitação anual gira em torno de 2.300 mm, distribuídos em duas estações bem definidas: 1) O período chuvoso, caracterizado pela maior precipitação pluviométrica no primeiro semestre do ano (inverno amazônico); 2) o período menos chuvoso que ocorre no segundo semestre (verão amazônico). Esse é caracterizado por período de estiagem (precipitação pluvial < 100 mm por mês), de setembro a novembro (Souza & Cunha, 2010; Alvares *et al.*, 2013).

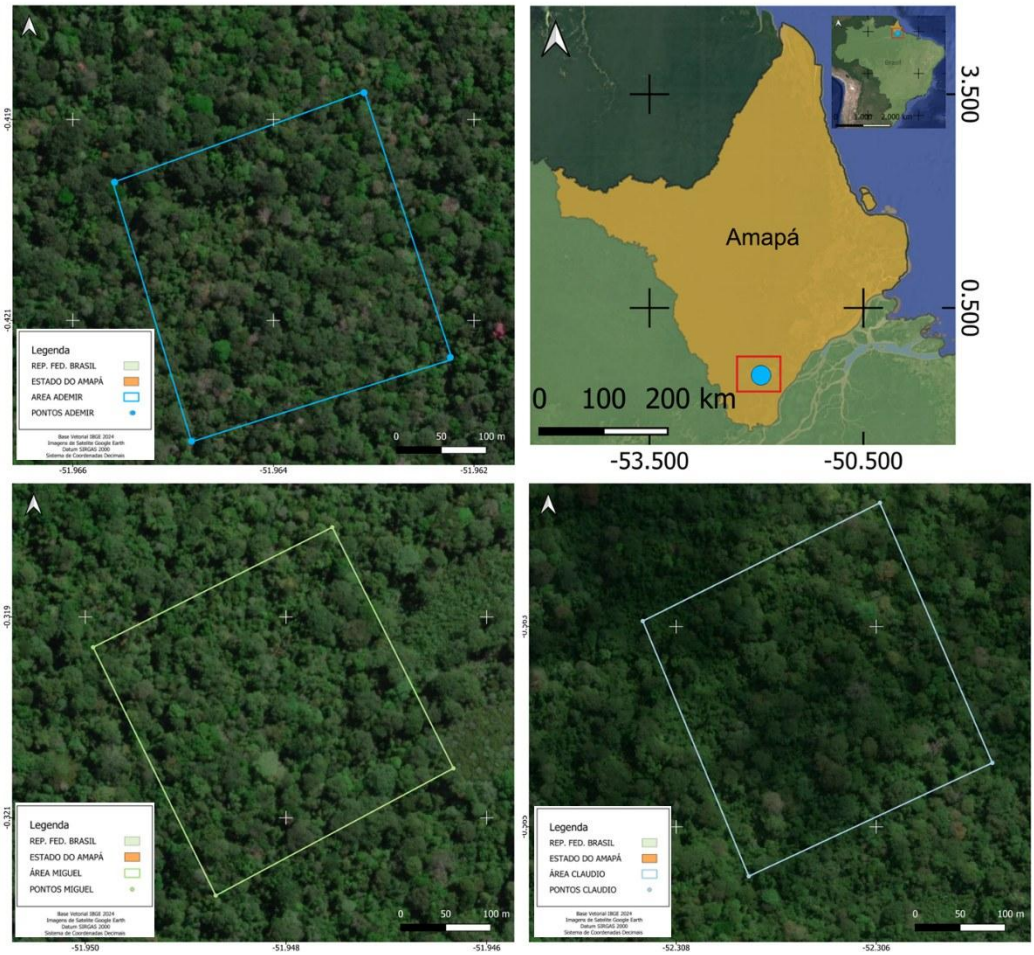
A vegetação predominante corresponde a floresta ombrófila densa de terra firme, típica do domínio amazônico, com elevada diversidade florística e presença de espécies arbóreas emergentes de grande porte, entre as quais se destaca a castanheira-da-amazônia. Essa espécie desempenha papel ecológico importante na estrutura da floresta e apresenta grande relevância socioeconômica para

populações locais devido à produção da castanha-do-brasil (Chiriboga-Arroyo *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2020). As áreas de terra firme onde ocorrem os castanhais são ocupadas por florestas com diferentes ambientes e tipologias: Floresta Ombrófila Densa Submontana com dossel emergente. Savana com Floresta de galeria ou Contato Floresta/Cerrado (IBGE, 1992).

Os solos da região são predominantemente altamente intemperizados, com forte influência de processos de lixiviação e intensa meteorização química, resultando em perfis geralmente ácidos, com baixa saturação por bases e elevada presença de óxidos de ferro e alumínio (Quesada *et al.*, 2020; Oliveira Junior *et al.*, 2021). Essas características conferem aos solos amazônicos uma fertilidade natural relativamente baixa, fortemente dependente da dinâmica da matéria orgânica e da formação de complexos organominerais. Especificamente, as áreas de estudo situam-se sobre diferentes materiais de origem, incluindo sedimentos da Formação Barreiras e rochas do embasamento cristalino, o que pode resultar em variações na textura, na mineralogia e na fertilidade natural dos solos entre as três áreas amostradas.

A distribuição espacial dos pontos amostrais em cada área permitiu a aplicação de análises geoestatísticas para investigar a variabilidade espacial dos atributos do solo. A Figura 1 apresenta a localização das três áreas de estudo no contexto do estado do Amapá e da Amazônia brasileira, com a delimitação das malhas amostrais.

Figura 1. Localização das áreas de estudo em castanhais naturais na Reserva Extrativista do Rio Cajari (Resex Cajari), estado do Amapá, Amazônia brasileira. São apresentadas as três áreas amostradas — Cláudio (Laranjal do Jari), K7 e Miguel (Mazagão) — distribuídas em diferentes tipologias de vegetação de terra firme, incluindo floresta ombrófila densa e ambientes de transição cerrado/floresta. Os mapas ilustram a posição geográfica das áreas no contexto regional da Amazônia e do estado do Amapá, bem como a delimitação das malhas amostrais utilizadas na coleta de dados para análise geoestatística dos atributos do solo.



Fonte: Os Autores, 2026

2.2 AMOSTRAGEM DE SOLO

A amostragem de solo foi realizada em malhas georreferenciadas estabelecidas nas áreas de estudo. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras de solo para análise de atributos químicos e físicos associados à fertilidade do solo e à dinâmica hidrológica do perfil. Foram estabelecidos 23 a 24 pontos amostrais por área (total de 70 pontos), distribuídos em malhas regulares com espaçamento aproximado de 50 m, dimensionadas para cobrir a heterogeneidade espacial esperada com base em estudos prévios em solos amazônicos e para permitir a modelagem geoestatística com número suficiente de pares por classe de distância.

A amostragem de solo foi realizada em pontos distribuídos sistematicamente dentro da área delimitada pela poligonal, permitindo capturar a variabilidade espacial dos atributos edáficos. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras de solo na camada superficial, utilizando trado de aço

inoxidável. Foram estabelecidos 60 pontos amostrais georreferenciados, distribuídos em malha regular com espaçamento aproximado de 50 m, dimensionada para cobrir a heterogeneidade espacial esperada com base em estudos prévios em solos amazônicos e para permitir a modelagem geoestatística com número suficiente de pares por classe de distância. A profundidade de 0 a 0,20 m, pois nela concentra-se a maior parte das raízes finas, atividade microbiana e processos de ciclagem biogeoquímica, sendo a mais frequentemente adotada em estudos de fertilidade do solo em ecossistemas florestais (Fuchslueger *et al.*, 2026).

No laboratório, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), conforme procedimentos analíticos usuais em análises de solos tropicais.

2.3 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

Para os atributos químicos determinados e calculador foram utilizados métodos descritos em Teixeira *et al.* (2017). Foram determinados os valores de pH em água (1:2,5); Al^{3+} e H+Al extraídos, respectivamente, com KCl 1 mol L^{-1} e acetado de cálcio e quantificados por titulação com NaOH 0,025 mol L^{-1}; teores de P, K e Na extraídos por Mehlich-1 e quantificados por colorimetria (P) e fotometria de chama (K e Na); teores de Ca e Mg extraídos por KCl 1 mol L^{-1} e quantificados por espectrometria de absorção atômica. Também foram determinados os teores de micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Se) que foram extraídos com DTPA a pH 7,3 (relação solo:solução 1:2) quantificados por espectrometria de absorção atômica (AAS), conforme metodologia padrão para elementos traço em solos tropicais (Lindsay & Norvell, 1978). Os atributos químicos calculados foram a CTC a pH 7,0, a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%), conforme cálculos indicados em Teixeira *et al.* (2017). Os atributos físicos determinados foram densidade e granulometria, adotando-se o método do anel volumétrico para densidade e o método da pipeta para a análise granulométrica (Teixeira *et al.* 2017).

Esses atributos são considerados fundamentais para a interpretação da fertilidade de solos tropicais altamente intemperizados, pois refletem processos pedogeoquímicos relacionados à acidez do solo, à disponibilidade de nutrientes e à capacidade de retenção de cátions (Quesada *et al.*, 2020; Bortoluzzi *et al.*, 2015).

A fração argila foi utilizada como indicador da textura do solo, uma vez que exerce influência direta sobre a retenção de água, a formação de agregados e a capacidade de troca catiônica do sistema edáfico. A textura do solo é particularmente relevante para a dinâmica hídrica, pois solos mais argilosos tendem a apresentar maior capacidade de retenção de água, influenciando a disponibilidade hídrica para a vegetação durante períodos de déficit pluviométrico.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Inicialmente, foram realizadas análises estatísticas descritivas para caracterizar a variabilidade dos atributos do solo em cada área, incluindo cálculo de média, valores mínimo e máximo, mediana, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV). A classificação da variabilidade com base no CV seguiu os critérios de Warrick & Nielsen (1980): baixa (CV < 12%), moderada (12% ≤ CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%).

A distribuição dos dados também foi avaliada para verificar a presença de assimetria ou valores discrepantes que pudessem influenciar as análises subsequentes. A normalidade das distribuições foi avaliada por meio do coeficiente de assimetria e inspeção gráfica (histogramas e gráficos Q-Q), sendo que valores de assimetria superiores a 1,0 indicaram a necessidade de transformação dos dados para análises posteriores, embora nenhuma transformação tenha sido aplicada neste estudo, optando-se pela robustez do estimador variográfico frente a desvios moderados da normalidade.

2.5 PROCEDIMENTOS GEOESTATÍSTICOS

2.5.1 Avaliação de tendência espacial

A presença de tendência espacial (drift) foi avaliada por regressão linear dos atributos em função das coordenadas X e Y. Esse procedimento permite verificar violação da hipótese de estacionaridade intrínseca, fundamental para a modelagem por variograma (Diggle, Tawn E Moyeed, 1998). Considerou-se tendência significativa quando os coeficientes da regressão apresentaram $p < 0,05$ e o coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 0,10. Nos casos em que a tendência foi detectada, optou-se pela modelagem com krigagem universal ou pela remoção da tendência por ajuste de superfície polinomial (Webster & Oliver, 2007).

2.5.2 Variograma experimental

O variograma experimental foi estimado conforme a equação (1):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

com adoção de oito classes de distância e limite máximo correspondente a 50% da distância máxima entre pontos, prática recomendada para evitar instabilidade em grandes distâncias (Webster; Oliver, 2007). A escolha de oito classes buscou equilibrar a necessidade de detalhamento da estrutura espacial com a manutenção de um número mínimo de pares (≥ 30 pares por classe) para assegurar estimativas estáveis do variograma experimental.

2.5.3 Ajuste do modelo teórico

Foi adotado o modelo esférico para ajuste dos variogramas devido à sua ampla aplicação em estudos de solos de regiões de clima tropical e sua capacidade de representar estrutura espacial com patamar definido (Nussbaum *et al.*, 2018; Webster; Oliver, 2007). O ajuste foi realizado pelo método dos mínimos quadrados ponderados, utilizando o software R (versão 4.2.2) e o pacote 'gstat' (Pebesma, 2004), com validação visual da qualidade do ajuste. Os parâmetros estimados foram: Efeito pepita (C_0), Patamar ($C_0 + C_1$) e Alcance (a)

O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado conforme a equação (2):

$$IDE = \frac{C_0}{C_0+C_1} \qquad (2)$$

A classificação adotada foi aquela de CAMBARDELLA *et al.* (1994): Forte: IDE ≤ 0,25; Moderada: 0,25 < IDE ≤ 0,75; e, Fraca: IDE > 0,75

2.5.4 Validação cruzada

Foi aplicada validação cruzada do tipo 5-fold, estimando RMSE (Root Mean Square Error) e RMSSE (Root Mean Square Standardized Error).

A validação cruzada é amplamente recomendada para avaliar desempenho preditivo e robustez de modelos espaciais (Diggle, Tawn E Moyeed, 1998). Valores de RMSSE próximos a 1,0 indicaram modelos bem calibrados, enquanto desvios significativos (RMSSE < 0,5 ou > 1,5) foram utilizados como critério para reavaliação do ajuste do variograma ou da escolha do modelo teórico.

2.6 CONSOLIDAÇÃO COMPARATIVA INTER-ÁREAS

Para assegurar comparabilidade estrutural entre áreas, foram padronizados: Modelo teórico (esférico), Número de classes de distância, Critérios de transformação e Classificação do IDE.

A análise comparativa seguiu abordagem recomendada para estudos multi-sítio em solos tropicais, permitindo interpretação integrada dos padrões espaciais (Rossel *et al.*, 2016; Vepraskas, Lindbo & Lin, 2012). Embora os procedimentos tenham sido padronizados, a interpretação dos resultados considerou as particularidades de cada área, como escala da paisagem, heterogeneidade geomorfológica e densidade amostral, evitando comparações mecânicas e assegurando relevância ecológica às inferências.

2.7 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL POR KRIGAGEM

A interpolação espacial foi realizada por krigagem ordinária (KO) para três atributos por área, priorizando variáveis pedogeoquimicamente integradoras (argila, CTC a pH 7 e P) e, quando necessário, substituindo por variáveis com melhor consistência amostral e relevância funcional (por exemplo, Fe como indicador redox). A KO foi aplicada somente a atributos com estrutura espacial interpretável a partir do variograma ajustado e com número mínimo de observações válido por área. A krigagem foi conduzida com base no modelo de variograma previamente ajustado (modelo esférico), utilizando os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e alcance (a) estimados para cada atributo.

As predições foram geradas em uma malha regular cobrindo a extensão da área amostrada (com pequena margem), produzindo mapas contínuos de predição. A resolução do grid de saída foi padronizada em 10 m para todas as áreas, garantindo detalhamento espacial compatível com a escala dos fenômenos investigados. Adicionalmente, foi obtida a variância de krigagem, interpretada como medida espacial de incerteza associada à densidade/distribuição amostral e ao modelo do variograma, permitindo identificar regiões com maior/menor confiabilidade cartográfica. A avaliação do desempenho preditivo seguiu princípios de validação e diagnóstico amplamente recomendados na literatura de mapeamento de solos e validação de modelos espaciais (Piikki *et al.*, 2021).

2.8 MODELO CONCEITUAL SOLO-ÁGUA-CASTANHEIRA

Com base na integração entre os resultados geoestatísticos e o conhecimento ecofisiológico da espécie *Bertholletia excelsa*, foi proposto um modelo conceitual representando as interações entre propriedades do solo, retenção de água e funcionamento hidráulico da castanheira. O modelo foi elaborado considerando as relações causais hipotéticas entre textura do solo, capacidade de troca catiônica, retenção hídrica, fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera e crescimento radial das árvores

O modelo conceitual ilustra como gradientes espaciais de textura e fertilidade podem influenciar simultaneamente a retenção de água no solo, a disponibilidade de nutrientes e o transporte de água no sistema solo-planta, afetando potencialmente o crescimento radial e o desempenho fisiológico das árvores em castanhais naturais. As setas indicam relações causais hipotéticas, e a espessura das setas representa a força relativa da influência de cada fator, conforme inferido a partir da estrutura espacial observada nas três áreas estudadas.

2.9 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas no software R (versão 4.2.2), utilizando os pacotes 'gstat' para análise variográfica e krigagem (Pebesma, 2004), 'ggplot2' para visualização gráfica, 'raster' para manipulação dos mapas interpolados e 'sf' para operações com dados espaciais. Os scripts utilizados nas análises estão disponíveis mediante solicitação aos autores, assegurando a reprodutibilidade dos resultados.

3 RESULTADOS

3.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise estatística dos atributos químicos e físicos do solo nas três áreas amostradas no estado do Amapá revelou ampla variabilidade, característica típica de solos tropicais altamente intemperizados. De modo geral, observou-se grande amplitude de valores para atributos associados à acidez do solo, capacidade de troca catiônica e textura (Tabela 1).

Os resultados indicam diferenças entre as áreas, mesmo sob relativa proximidade geográfica. A Área 2 (MIGUEL) apresentou maiores teores médios de argila (338 g kg^{-1}) e fósforo disponível (44,9 mg dm^{-3}), enquanto a Área 1 (CLAUDIO) apresentou os menores valores para a maioria dos atributos.

Os teores de fósforo disponível apresentaram variação expressiva entre os pontos amostrados, com médias variando entre as áreas e coeficientes de variação em torno de 30–32%. A amplitude dos valores de P variou de 21,6 a 75,6 mg dm^{-3}.

Os valores de acidez potencial (H+Al) apresentaram elevada variabilidade, com coeficientes de variação entre 75% e 80%. As médias variaram de 0,46 a 0,52 cmolc dm^{-3}, com valores máximos atingindo 1,63 cmolc dm^{-3}.

A fração argila apresentou variabilidade moderada, com coeficientes de variação entre 20,1% e 22,4%, e médias variando de 321 a 338 g kg^{-1} entre as áreas.

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos principais atributos químicos e físicos do solo nas três áreas de castanhal avaliadas no estado do Amapá, Amazônia brasileira. São apresentados o número de observações (n), valores mínimo e máximo, média, mediana, desvio-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A classificação da variabilidade com base no CV segue os critérios de Warrick & Nielsen (1980): baixa (CV < 12%), moderada (12% ≤ CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%).

Área	Atributo	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)
Claudio	Argila	60	113,5	244,5	178,1	176,3	29,6	16,6
	H+Al	60	0,91	4,11	1,99	1,98	0,54	26,96
	T	60	2,09	6.61	3,79	3,88	0,90	23,65
	P	60	2,0	10,0	3,47	3,0	1,46	41,98
Miguel	Argila	30	274,5	433,5	354,6	357,0	44,49	12,55
	H+Al	30	1,39	7,85	3,83	3,70	1,64	42,73
	T	30	4,35	15,64	9,68	9,54	2,30	23,80
	P	30	1,82	4,80	2,68	2,51	0,64	23,76
Ademir	Argila	23	160,66	462,6	334,56	335,50	70.88	21.19
	H+Al	23	0,12	1,55	0,46	0,38	0,37	80,36
	T	23	0,29	6,69	1,18	0,67	1,58	134,46
	P	23	24,67	73,12	43,21	39,87	13,79	31,93

Fonte: Os Autores, 2026

3.2 ESTRUTURA DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise geoestatística indicou que os atributos avaliados apresentaram estrutura espacial definida, evidenciada pelo ajuste dos variogramas experimentais ao modelo esférico (Tabela 2).

Os índices de dependência espacial variaram de moderados a fortes. Os atributos H+Al e T (CTC a pH 7) apresentaram forte dependência espacial em todas as áreas (IDE entre 0% e 6%).

A fração argila apresentou dependência espacial moderada (IDE entre 52% e 55%), enquanto o fósforo disponível também apresentou dependência moderada (IDE entre 52% e 53%).

Os alcances espaciais estimados variaram entre 340 e 350 m para todos os atributos e áreas avaliadas.

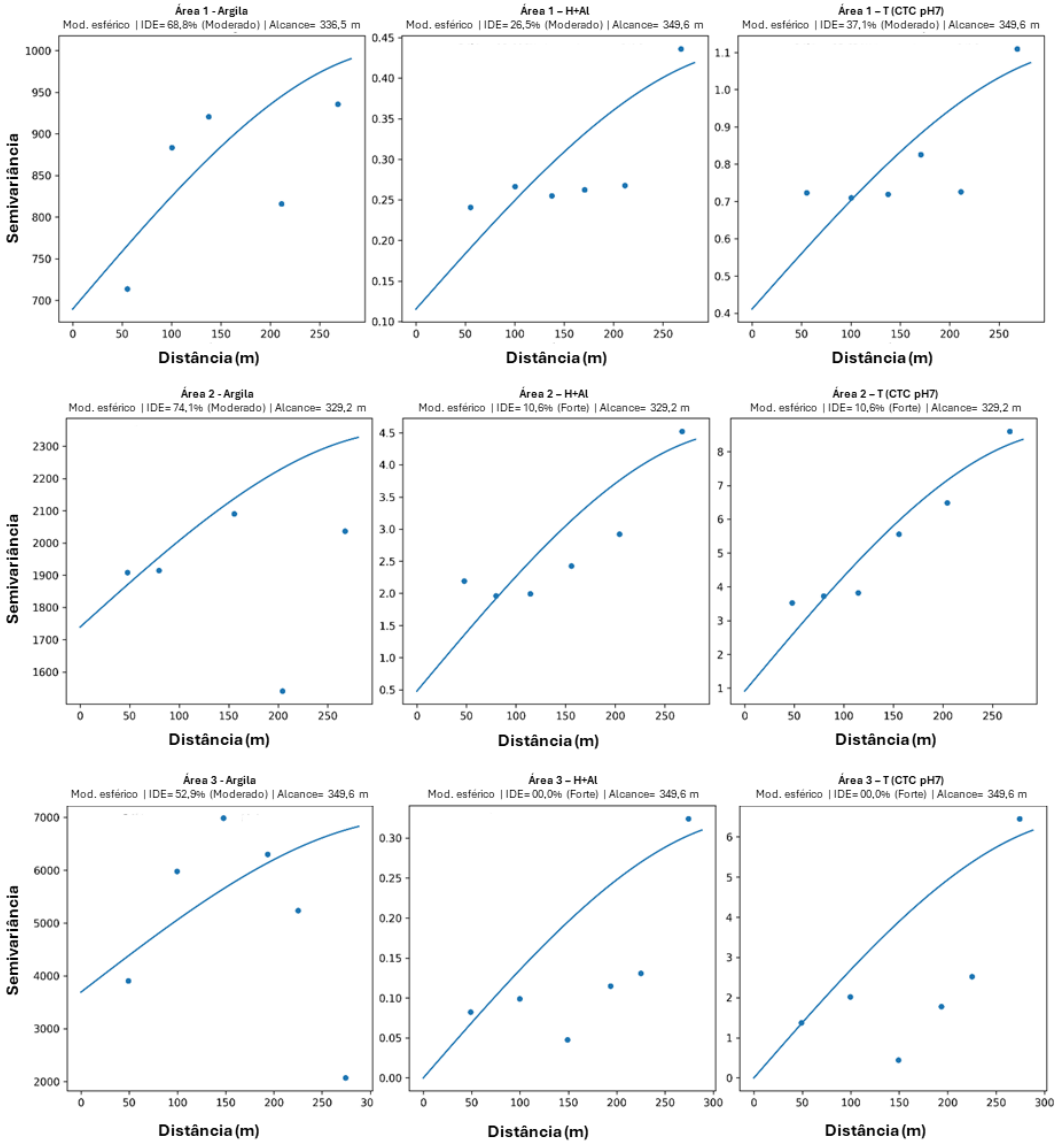
Exemplos representativos dos variogramas ajustados são apresentados na Figura 2, com legendas expandidas para incluir os parâmetros do modelo ajustado e a classificação da dependência espacial.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para atributos representativos do solo nas áreas de castanhal do estado do Amapá. São apresentados o efeito pepita (C_0), a variância estrutural (C_1), o patamar do variograma (C_0+C_1), o alcance espacial e o índice de dependência espacial (IDE). A classe de dependência espacial foi definida conforme Cambardella *et al.* (1994), sendo classificada como forte (IDE ≤ 25%), moderada (25% < IDE ≤ 75%) ou fraca (IDE > 75%).

Área	Atributo	Modelo	C_0	C_1	Patamar	Alcance (m)	IDE (%)	Classe
Claudio	Argila	Esférico	715,37	291,45	1006,81	349,57	71,05	Moderada
	H+Al	Esférico	0,10	0,33	0,44	349,57	23,68	Forte
	T	Esférico	0,42	0,69	1,11	349,57	37,90	Moderada
	P	Esférico	0,48	2,92	3,40	349,57	14,21	Forte
Miguel	Argila	Esférico	1738,99	607,27	2346,26	329,23	74,12	Moderada
	H+Al	Esférico	0,48	4,04	4,52	329,23	10,59	Forte
	T	Esférico	0,91	7,69	8,60	329,23	10,59	Forte
	P	Esférico	0,34	0,16	0,50	329,23	68,82	Moderada
Ademir	Argila	Esférico	3692,18	3281,93	6974,11	349,57	52,94	Moderada
	H+Al	Esférico	0,00	0,32	0,32	349,57	0,00	Forte
	T	Esférico	0,00	6,45	6,45	349,57	0,00	Forte
	P	Esférico	132,23	117,53	249,76	349,57	52,94	Moderada

Fonte: Os Autores, 2026

Figura 2. Variogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para atributos representativos do solo nas três áreas de castanhal avaliadas no estado do Amapá, Amazônia brasileira. Cada painel apresenta a semivariância (γ) em função da distância (h). A linha tracejada horizontal indica o patamar do modelo ajustado. Os parâmetros dos modelos (efeito pepita, patamar, alcance e IDE) estão apresentados na Tabela 2. Os painéis apresentam a estrutura de dependência espacial para a fração argila (dependência moderada), a acidez potencial (H+Al) (dependência forte) e a capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) (dependência forte), permitindo comparar a organização espacial dos atributos edáficos entre as áreas estudadas.



Fonte: Os Autores, 2026

3.3 TENDÊNCIA ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

A análise de tendência espacial indicou a presença de gradientes significativos para os atributos H+Al e T nas três áreas (Tabela 3), com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,39 e 0,42 e significância estatística ($p < 0,05$).

Para esses atributos, os coeficientes βX e βY foram negativos, indicando padrão direcional na distribuição espacial.

Para a fração argila e o fósforo disponível, não foram observadas tendências espaciais significativas ($p > 0,05$; $R^2 \leq 0,09$).

Tabela 3. Resultados do teste de tendência espacial aplicado aos atributos do solo nas áreas de estudo do estado do Amapá. São apresentados os coeficientes da regressão linear espacial (βX e βY), o coeficiente de determinação (R^2), o valor do teste F e o nível de significância (p-valor). A interpretação indica a presença ou ausência de tendência espacial significativa na distribuição dos atributos do solo. Valores de $p < 0,05$ indicam tendência espacial significativa.

Área	Atributo	βX	βY	R^2	Interpretação
Claudio	Argila	0,1167	0,0695	0,1585	Significativa
	H+Al	-0,0003	0,0004	0,0069	Não significativa
	T	0,0003	0,0016	0,0244	Não significativa
	P	-0,0003	0,0026	0,0238	Não significativa
Miguel	Argila	0,0133	-0,1582	0,1157	Não significativa
	H+Al	0,0063	-0,0032	0,1277	Não significativa
	T	-0,0072	-0,0056	0,0763	Não significativa
	P	0,0010	0,0020	0,0811	Não significativa
Ademir	Argila	0,2077	-0,0046	0,0826	Não significativa
	H+Al	-0,0025	-0,0006	0,4206	Significativa
	T	-0,0106	-0,0013	0,4135	Significativa
	P	0,0077	0,0455	0,0777	Não significativa

Fonte: Os Autores, 2026

3.4 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO

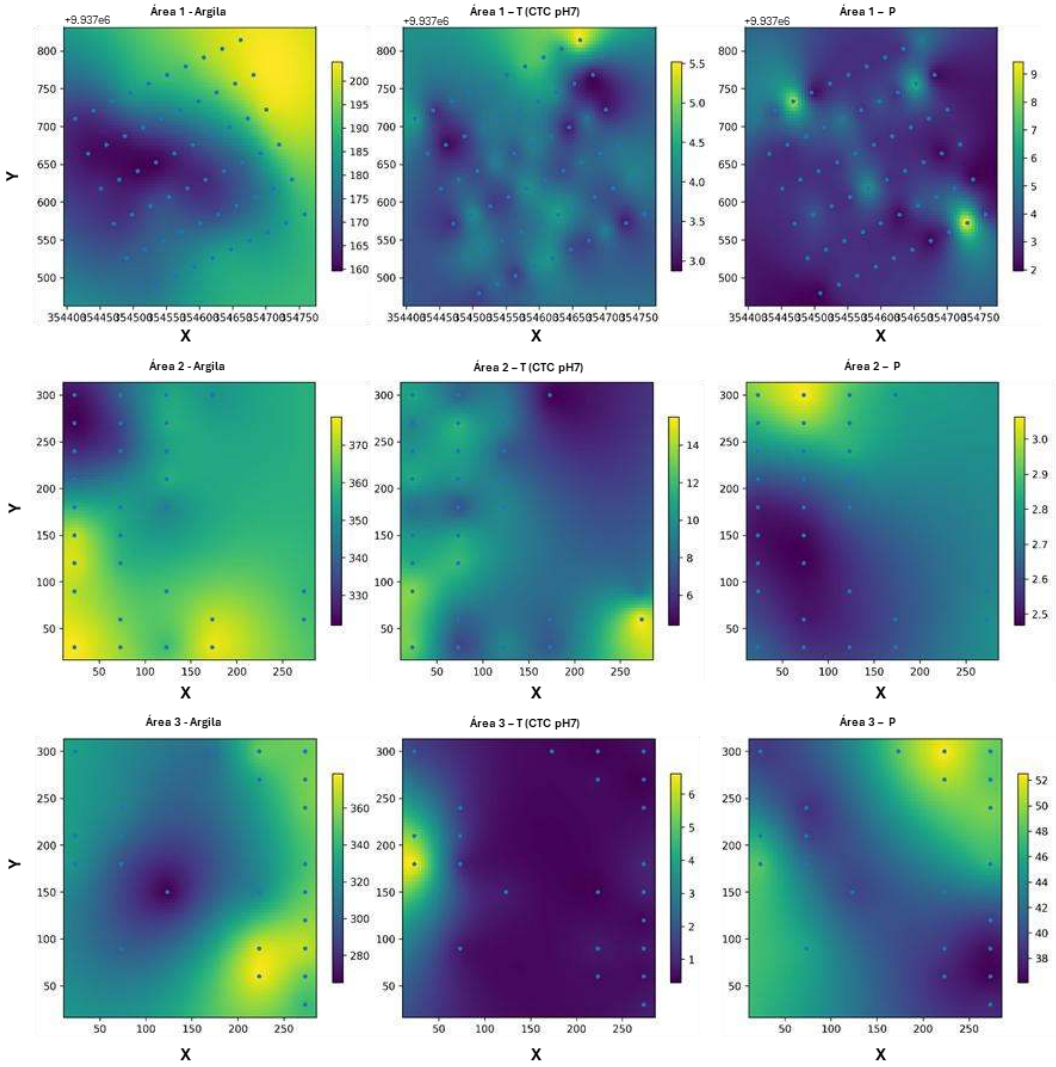
A interpolação espacial por krigagem ordinária permitiu gerar superfícies contínuas de distribuição dos atributos do solo nas áreas estudadas.

Os mapas evidenciaram padrões espaciais distintos entre as áreas. A Área 2 |(Miguel) apresentou zonas mais extensas e contínuas de valores elevados de argila, T e P, enquanto a Área 1 (Claudio) apresentou maior fragmentação espacial desses atributos.

A fração argila apresentou gradientes espaciais relativamente contínuos, enquanto os atributos químicos (T e P) apresentaram distribuição mais heterogênea, com variações espaciais mais abruptas.

A Figura 3 apresenta os mapas de krigagem para atributos representativos do solo nas três áreas avaliadas, incluindo a fração argila, a capacidade de troca catiônica (T) e o fósforo disponível. A comparação entre as áreas demonstra que, embora compartilhem características pedológicas comuns, cada área apresenta padrões espaciais próprios de organização da fertilidade. Observa-se que a Área 2 (Miguel) apresenta as zonas de maior fertilidade (maiores teores de argila, T e P) mais extensas e contíguas, enquanto a Área 1 (Claudio) apresenta padrões mais fragmentados, com manchas de fertilidade isoladas.

Figura 3. Mapas de interpolação espacial obtidos por krigagem ordinária para atributos representativos do solo nas três áreas de castanhal avaliadas no estado do Amapá, Amazônia brasileira. A escala de cores representa os valores preditos para cada atributo, com tons mais quentes (vermelho/amarelo) indicando maiores concentrações e tons mais frios (azul/verde) indicando menores concentrações. Os pontos pretos representam as localizações amostrais. Os painéis apresentam a distribuição espacial da fração argila, da capacidade de troca catiônica a pH 7 (T) e do fósforo disponível (P), permitindo comparar a organização espacial da textura e da fertilidade do solo entre as áreas estudadas. Os mapas evidenciam a formação de mosaicos edáficos intra-área, indicando que a variabilidade espacial dos atributos do solo ocorre em escalas compatíveis com gradientes pedológicos e hidrológicos locais.



Fonte: Os Autores, 2026

3.5 SÍNTESE DOS PADRÕES ESPACIAIS DA FERTILIDADE DO SOLO

Os resultados evidenciam que os atributos do solo apresentam variabilidade espacial estruturada, com predominância de dependência moderada a forte (Tabela 4).

Foram identificados três padrões principais:

1 - Atributos com forte dependência espacial (h+al e t)

2 - Atributos com dependência moderada (argila e p)

3 - Maior variabilidade química em comparação à variabilidade textural

A organização espacial dos atributos apresentou consistência entre as áreas, apesar das diferenças nos valores médios.

Tabela 4. Síntese estatística e geoestatística dos principais atributos do solo nas áreas avaliadas no estado do Amapá. A tabela integra os resultados das análises descritivas e dos parâmetros variográficos, permitindo identificar padrões de variabilidade e dependência espacial dos atributos edáficos nas áreas de castanhal estudadas.

Área	Atributo	Média ± DP	CV (%)	Modelo	Alcance (m)	IDE (%)	Classe
Claudio	Argila	178,07 ± 29,64	16,65	Esférico	349,57	71,05	Moderada
	H+Al	1,99 ± 0,54	26,96	Esférico	349,57	23,68	Forte
	T	3,79 ± 0,90	23,65	Esférico	349,57	37,90	Moderada
	P	3,47 ± 1,46	41,98	Esférico	349,57	14,21	Forte
Miguel	Argila	354,58 ± 44,49	12,55	Esférico	329,23	74,12	Moderada
	H+Al	3,83 ± 1,64	42,73	Esférico	329,23	10,59	Forte
	T	9,68 ± 2,30	23,80	Esférico	329,23	10,59	Forte
	P	2,68 ± 0,64	23,76	Esférico	329,23	68,82	Moderada
Ademir	Argila	334,56 ± 70,88	21,19	Esférico	349,57	52,94	Moderada
	H+Al	0,46 ± 0,37	80,36	Esférico	349,57	0,00	Forte
	T	1,18 ± 1,58	134,46	Esférico	349,57	0,00	Forte
	P	43,21 ± 13,79	31,93	Esférico	349,57	52,94	Moderada

Fonte: Os Autores, 2026

Os padrões espaciais identificados indicam que a variabilidade dos atributos do solo não ocorre de forma aleatória, sugerindo a atuação de processos estruturantes que serão discutidos à luz dos mecanismos pedogenéticos, hidrológicos e ecofisiológicos na seção seguinte.”

4 DISCUSSÃO

4.1 ESTRUTURA ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO NAS ÁREAS DE CASTANHAIS DO AMAPÁ

A análise geoestatística das três áreas amostradas no estado do Amapá evidenciou que os atributos químicos e físicos do solo apresentam estrutura espacial bem definida, com predominância de modelos esféricos e dependência espacial variando de moderada a forte. Esse padrão é consistente com a organização pedológica típica de solos altamente intemperizados da Amazônia, nos quais processos de redistribuição hídrica, ciclagem biogeoquímica e dinâmica da matéria orgânica contribuem para a formação de mosaicos edáficos na escala da paisagem (Laurance *et al.*, 2010; Quesada *et al.*, 2020).

A consistência do modelo esférico entre as áreas indica que os processos pedogenéticos que controlam a distribuição espacial dos atributos atuam de forma semelhante nos castanhais do Amapá. Esse comportamento sugere a atuação conjunta de processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos na organização da fertilidade do solo (Quesada *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2019).

A uniformidade dos alcances espaciais (~340–350 m) reforça que esses processos operam em uma escala espacial consistente, possivelmente associada à homogeneidade geomorfológica das áreas de platô (Shimabukuro *et al.*, 2006; Araújo, Oliveira Junior & Beldini, 2024).

A elevada variabilidade espacial da fertilidade observada neste estudo também é consistente com padrões descritos para solos amazônicos em escala regional, nos quais gradientes pedogenéticos e hidrológicos controlam simultaneamente a distribuição de nutrientes e a dinâmica da matéria orgânica no perfil do solo (Quesada *et al.*, 2020). No entanto, a magnitude da variabilidade química observada no Amapá (CVs de 75–80% para H+Al e 129–134% para T) é superior à relatada para outras regiões amazônicas, sugerindo que os castanhais do Amapá apresentam heterogeneidade química particularmente elevada, possivelmente associada à complexidade dos materiais de origem e à dinâmica diferenciada da ciclagem de nutrientes na região (Guerreiro *et al.*, 2017; Tourne *et al.*, 2019).

A dependência espacial forte observada para atributos como Al^{3+}, H+Al e capacidade de troca catiônica (CTC) sugere que esses parâmetros estão associados a processos pedogenéticos relativamente estáveis, relacionados à mineralogia da fração argilosa e à dinâmica da matéria orgânica no solo (Silva *et al.*, 2022). Em ambientes tropicais altamente lixiviados, a retenção de cátions e a capacidade de tamponamento do solo dependem fortemente da presença de complexos organominerais e da superfície reativa dos minerais de argila, que regulam simultaneamente a disponibilidade de nutrientes e a retenção de água no perfil do solo (Quesada *et al.*, 2020). A forte dependência espacial desses atributos, associada à tendência regional detectada (R^2 = 0,39–0,42), indica que a acidez potencial e a CTC são controladas por gradientes pedogenéticos de larga escala, possivelmente relacionados à posição na paisagem ou à profundidade do solo, com alta previsibilidade espacial (Silva *et al.*, 2023; Bonfim Neto, 2024).

A fração argila apresentou dependência espacial moderada nas três áreas (IDE = 52–55%), indicando que, embora haja estruturação espacial detectável, existe também um componente significativo de variabilidade local. Esse padrão sugere que a textura do solo é influenciada tanto por processos regionais quanto por processos locais, como redistribuição superficial e microtopografia (Guerreiro *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2004).

O fósforo disponível também apresentou dependência espacial moderada nas três áreas (IDE = 52–53%), indicando que sua distribuição é controlada por uma combinação de fatores estruturais e locais. A dependência moderada do P no Amapá contrasta com padrões observados em outras regiões amazônicas, sugerindo maior influência de processos biogeoquímicos locais sobrepostos aos gradientes pedogenéticos regionais (Darela-Filho *et al.*, 2024; Lange *et al.*, 2024).

Os alcances espaciais estimados (340–350 m) indicam que a autocorrelação dos atributos do solo ocorre em escalas compatíveis com a dimensão das áreas amostradas. Essa uniformidade sugere que os processos pedogenéticos e hidrológicos que controlam a distribuição espacial dos atributos atuam em uma escala espacial consistente nos castanhais do Amapá (Viana Santos *et al.*, 2023). Estudos recentes demonstram que a variabilidade espacial das propriedades do solo em florestas tropicais pode explicar diferenças locais na produtividade e na dinâmica estrutural da vegetação, reforçando a importância de compreender os mosaicos edáficos em escala de paisagem (Soong *et al.*, 2020).

4.2 TENDÊNCIA ESPACIAL E FORMAÇÃO DE GRADIENTES EDÁFICOS REGIONAIS

Os testes de tendência espacial revelaram gradientes significativos para H+Al e T em todas as três áreas, com coeficientes negativos para βX e βY e R^2 variando de 0,39 a 0,42. Esse resultado indica que a acidez potencial e a capacidade de troca catiônica diminuem sistematicamente em direção às bordas das áreas amostradas, sugerindo a presença de gradientes regionais associados à posição na paisagem (Laurance *et al.*, 2010).

A consistência desse padrão entre as três áreas sugere que processos geomorfológicos de larga escala — possivelmente relacionados à profundidade do solo ou à posição no relevo — controlam a distribuição espacial desses atributos nos castanhais do Amapá (Araújo, Oliveira Junior & Beldini, 2024).

Em contraste, a ausência de tendência espacial para a fração argila e o fósforo disponível indica que a variabilidade desses atributos é controlada predominantemente por processos locais. No caso do fósforo, essa variabilidade pode ser atribuída à ciclagem biogeoquímica, incluindo deposição de serapilheira e atividade microbiana, que promovem a formação de zonas localizadas de maior disponibilidade (Schaap *et al.*, 2021; Schaap *et al.*, 2022).

Esses resultados evidenciam a coexistência de dois níveis de controle na organização espacial da fertilidade do solo: um controle regional, associado a processos pedogenéticos, e um controle local, relacionado a processos ecológicos e biogeoquímicos. Essa dualidade é fundamental para compreender a distribuição dos recursos edáficos e suas implicações para a vegetação (Thomas *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021).

4.3 SOLO, RETENÇÃO DE ÁGUA E FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DA CASTANHEIRA

A heterogeneidade espacial dos atributos do solo observada nas áreas de castanhal do Amapá possui implicações diretas para o funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia

(*Bertholletia excelsa*). Em ecossistemas tropicais úmidos, a disponibilidade de água no solo é fortemente controlada pela textura, pela capacidade de troca catiônica e pelo conteúdo de matéria orgânica, que influenciam simultaneamente a retenção hídrica e a dinâmica dos nutrientes (Quinto-Mosquera & Moreno-Hurtado, 2016; Cuevas, 1995).

Solos com maior proporção de argila tendem a apresentar maior capacidade de retenção de água, reduzindo a velocidade de drenagem e aumentando a disponibilidade hídrica para as plantas durante períodos de déficit pluviométrico. Em contraste, solos com menor capacidade de retenção podem favorecer a ocorrência de estresse hídrico mesmo em ambientes com elevada precipitação anual (Bruand & Hartmann, 2005; Rodrigues *et al.*, 2024).

Nos castanhais do Amapá, os teores médios de argila conferem capacidade moderada de retenção hídrica, mas a variabilidade espacial desse atributo indica que a disponibilidade de água pode variar significativamente dentro de cada área, criando microambientes com diferentes regimes hídricos (Oliveira Junior *et al.*, 2021).

Esse mecanismo é particularmente relevante para árvores de grande porte como *Bertholletia excelsa*, que dependem de reservas hídricas profundas no solo para sustentar a transpiração e o funcionamento fisiológico durante a estação seca (Schwendenmann *et al.*, 2015). A variabilidade espacial da argila sugere que a retenção hídrica ocorre em escala local, com distribuição heterogênea na paisagem.

A forte dependência espacial da CTC e de H+Al indica que a capacidade de retenção de nutrientes e a acidez do solo são altamente estruturadas, permitindo identificar zonas com maior potencial de fertilidade que podem coincidir com áreas de maior retenção hídrica, formando compartimentos funcionais favoráveis ao desenvolvimento da castanheira (Batista *et al.*, 2016; de Souza, 2020).

4.4 IMPLICAÇÕES PARA O CRESCIMENTO RADIAL DA CASTANHEIRA

A relação entre propriedades do solo, disponibilidade hídrica e funcionamento hidráulico das árvores possui implicações diretas para o crescimento radial da castanheira. Estudos dendroecológicos demonstram que o crescimento de *Bertholletia excelsa* é altamente sensível à disponibilidade de água no solo e às variações climáticas associadas à estação seca (Oliveira *et al.*, 2024; Ivanov, 2011).

A heterogeneidade espacial da retenção hídrica nos castanhais do Amapá, inferida a partir da variabilidade da argila e da CTC, sugere que o crescimento das árvores pode variar significativamente dentro de cada área em função da posição nos mosaicos edáficos identificados (Batista, 2018; Oliveira, 2024).

Nesse contexto, a organização espacial da fertilidade sugere que gradientes pedológicos podem gerar diferenças locais no crescimento das árvores. Solos com maior capacidade de retenção hídrica e maior disponibilidade de nutrientes tendem a favorecer taxas mais elevadas de crescimento radial, enquanto condições mais restritivas podem limitar o desempenho fisiológico das árvores (Frare & Ramos, 2024; Palheta & Santos Filho, 2023).

A identificação de zonas com maior CTC e maior teor de argila permite formular a hipótese de que as castanheiras localizadas nessas áreas apresentam maior crescimento e produtividade, hipótese que pode ser testada em estudos futuros integrando dados geoestatísticos e dendrocronológicos (Guedes *et al.*, 2023; Silva, 2022).

4.5 MODELO CONCEITUAL DAS INTERAÇÕES SOLO–ÁGUA–FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO–CRESCIMENTO DA CASTANHEIRA

A integração dos resultados permite propor um modelo conceitual que descreve as interações entre propriedades do solo, disponibilidade hídrica e funcionamento ecofisiológico da castanheira (Figura 4).

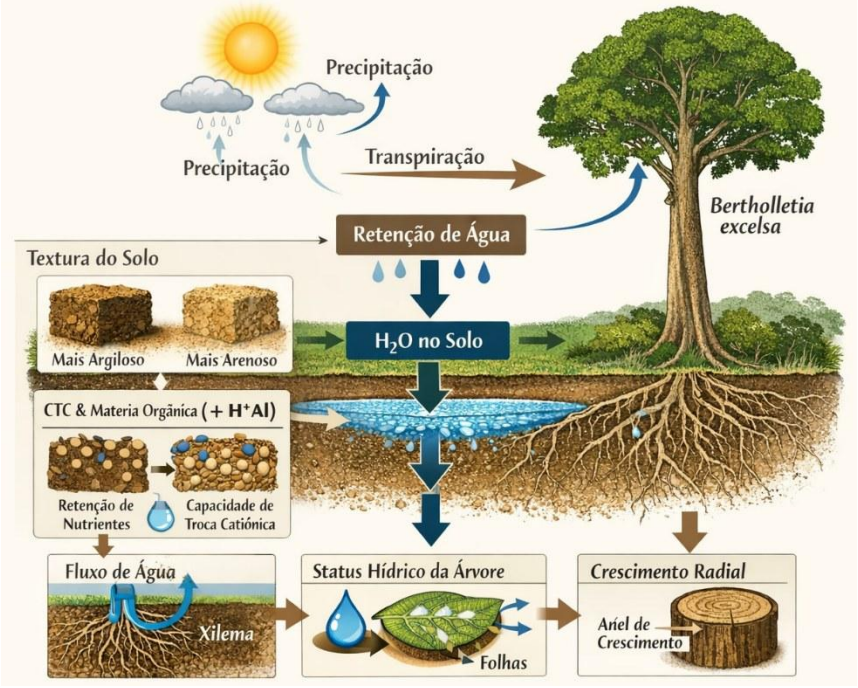
Nesse modelo, a textura do solo e a capacidade de troca catiônica (CTC) atuam como atributos estruturais que modulam simultaneamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes no sistema edáfico. A forte dependência espacial da CTC e de H+Al indica que a capacidade de retenção de nutrientes constitui um componente estrutural da paisagem, enquanto a variabilidade da argila e do fósforo reflete a atuação de processos locais superpostos aos gradientes pedogenéticos.

A organização espacial desses atributos define compartimentos funcionais na paisagem, nos quais o fluxo hídrico no sistema solo–planta tende a apresentar diferentes níveis de estabilidade. Em zonas com maior retenção hídrica e maior capacidade de troca catiônica, o funcionamento hidráulico das árvores tende a ser mais estável, favorecendo a manutenção da atividade fisiológica ao longo do tempo.

Essa estruturação espacial implica que o crescimento radial e o desempenho fisiológico da castanheira não dependem apenas da fertilidade média do solo, mas da posição relativa das árvores nos mosaicos edáficos. Assim, a heterogeneidade pedogeoquímica da paisagem atua como um fator regulador da variabilidade intra-área no crescimento e na produtividade da espécie.

Dessa forma, o modelo conceitual proposto integra processos pedogenéticos, hidrológicos e ecofisiológicos em uma estrutura funcional única, fornecendo uma base teórica para interpretar como a variabilidade espacial do solo se traduz em padrões ecológicos observáveis em castanhais amazônicos.

Figura 4. Modelo conceitual das interações entre propriedades do solo, disponibilidade hídrica e funcionamento ecofisiológico da castanheira-da-amazônia (Bertholletia excelsa) em castanhais naturais do estado do Amapá, Amazônia brasileira. O modelo integra a estrutura espacial dos atributos edáficos — especialmente fração argila, capacidade de troca catiônica (CTC) e acidez potencial (H+Al) — com processos hidrológicos e fisiológicos no sistema solo–planta–atmosfera. As setas representam relações causais hipotéticas entre os componentes do sistema, enquanto a espessura das setas indica a intensidade relativa das interações inferidas a partir da dependência espacial observada (maior para atributos com forte dependência, como CTC e H+Al, e intermediária para atributos com dependência moderada, como argila e fósforo). O modelo evidencia que a heterogeneidade espacial da fertilidade do solo estrutura compartimentos funcionais na paisagem, nos quais a retenção hídrica, a disponibilidade de nutrientes e o funcionamento hidráulico das árvores variam espacialmente, influenciando o crescimento radial e a produtividade da espécie.



Fonte: Elaborada pelos autores

O diagrama ilustra como propriedades pedológicas — particularmente a textura do solo, o conteúdo de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica (CTC) — controlam simultaneamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes no sistema edáfico. Solos com maior proporção de argila e maior atividade coloidal tendem a apresentar maior capacidade de retenção hídrica e maior estabilidade na oferta de nutrientes, favorecendo o armazenamento de água no perfil e a manutenção da disponibilidade hídrica para o sistema radicular (Barros *et al.*, 2013; Escolar & Lopes, 1969).

4.6 NOVIDADE CIENTÍFICA

Este estudo demonstra, de forma inédita para castanhais do estado do Amapá, que a fertilidade do solo apresenta organização espacial estruturada em mosaicos edáficos que transcendem a simples variabilidade local e refletem a atuação integrada de processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos em escala de paisagem.

A principal contribuição científica reside na integração entre a análise geoestatística da variabilidade edáfica e a interpretação ecofisiológica do funcionamento hidráulico da castanheira-da-

amazônia (*Bertholletia excelsa*). Essa abordagem permite avançar além da caracterização descritiva da fertilidade do solo, demonstrando que a heterogeneidade pedogeoquímica não apenas existe, mas exerce papel estruturante na regulação da disponibilidade hídrica, da dinâmica de nutrientes e, consequentemente, do desempenho fisiológico das árvores.

Os resultados indicam que atributos com forte dependência espacial, como a capacidade de troca catiônica e a acidez potencial, atuam como componentes estruturais da paisagem, definindo compartimentos edáficos com alta previsibilidade espacial. Em contraste, atributos com dependência moderada, como a fração argila e o fósforo disponível, refletem a atuação de processos locais, criando heterogeneidade em escala fina sobreposta aos gradientes regionais. Essa dualidade de controle — regional e local — constitui um dos principais avanços conceituais do estudo.

A partir dessa integração, propõe-se que o crescimento e a produtividade da castanheira não são determinados apenas por condições médias de fertilidade, mas pela posição relativa das árvores nos mosaicos edáficos da paisagem. Essa perspectiva introduz uma abordagem espacialmente explícita para interpretar padrões de crescimento em espécies florestais tropicais, representando um avanço em relação a modelos tradicionais baseados em médias edáficas.

Adicionalmente, ao incluir o estado do Amapá em um contexto comparativo mais amplo da Amazônia, este estudo contribui para preencher uma lacuna geográfica importante, ampliando a compreensão da variabilidade espacial da fertilidade do solo em diferentes contextos edafoclimáticos da bacia amazônica.

Dessa forma, o trabalho estabelece um arcabouço conceitual integrador que conecta processos pedológicos, hidrológicos e ecofisiológicos, oferecendo uma base teórica robusta para futuros estudos que busquem compreender a dinâmica de crescimento, produtividade e resiliência de espécies arbóreas em florestas tropicais sob condições de elevada heterogeneidade ambiental.

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que os atributos químicos e físicos do solo em castanhais naturais do estado do Amapá apresentam variabilidade espacial estruturada, organizada em mosaicos edáficos intra-área resultantes da interação entre processos pedogenéticos, hidrológicos e biogeoquímicos. A predominância de dependência espacial moderada a forte indica que a distribuição dos atributos do solo não ocorre de forma aleatória, mas segue padrões estruturais que refletem a organização da paisagem.

A consistência dos padrões espaciais observados entre as áreas sugere que processos pedogenéticos regionais atuam de forma relativamente homogênea na organização da fertilidade do

solo nos castanhais do Amapá. Em particular, atributos como capacidade de troca catiônica e acidez do solo apresentam elevada previsibilidade espacial, enquanto atributos como fração argila e fósforo disponível refletem maior influência de processos locais, resultando em heterogeneidade em escala fina.

A integração entre os resultados geoestatísticos e a interpretação ecofisiológica indica que a heterogeneidade espacial da fertilidade do solo pode desempenhar papel relevante na regulação da disponibilidade hídrica e no funcionamento hidráulico da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*). Nesse contexto, a organização espacial dos atributos do solo define compartimentos funcionais na paisagem, nos quais a disponibilidade de água e nutrientes varia espacialmente, influenciando potencialmente o crescimento e a produtividade da espécie.

Esses resultados evidenciam que a dinâmica ecológica dos castanhais amazônicos não pode ser compreendida apenas com base em valores médios de fertilidade, mas requer uma abordagem espacialmente explícita que considere a heterogeneidade edáfica e sua escala de organização. A aplicação de técnicas geoestatísticas mostrou-se eficiente para revelar esses padrões, contribuindo para uma compreensão integrada das relações entre solo, água e funcionamento da vegetação em ecossistemas florestais tropicais.

6 IMPLICAÇÕES PARA MANEJO E PESQUISA FUTURA

A identificação de padrões espaciais da fertilidade do solo fornece subsídios relevantes para estudos que buscam integrar processos pedológicos, hidrológicos e ecofisiológico na avaliação da dinâmica e da resiliência desses ecossistemas. Especificamente, recomenda-se que:

1. Estudos futuros nos castanhais do Amapá adotem malhas amostrais com espaçamento compatível com os alcances identificados (~350 m) para capturar adequadamente a variabilidade espacial dos atributos com forte dependência (H+Al, T), mas com densificação local (espaçamento < 50 m) para caracterizar a micro-heterogeneidade da argila e do fósforo.
2. Programas de monitoramento de longo prazo incorporem a compartimentalização funcional revelada pelos mapas de krigagem, estabelecendo parcelas permanentes distribuídas ao longo dos gradientes de CTC (zonas de alta vs. baixa fertilidade) e de argila (zonas de maior vs. menor retenção hídrica) para avaliar diferenças no crescimento radial, na produtividade de frutos e na resiliência da castanheira em função das condições edáficas.
3. Modelos de adequabilidade ambiental para a castanheira incorporem não apenas a fertilidade média, mas também a estrutura espacial dos atributos do solo e a escala de variação (alcances),

permitindo predições mais realistas da distribuição potencial da espécie em cenários atuais e futuros, especialmente considerando a forte estruturação espacial da CTC e da acidez no Amapá.

4. Estratégias de manejo adaptativo considerem as diferenças regionais na organização espacial da fertilidade do solo, com abordagens específicas para cada contexto amazônico: no Amapá, o zoneamento em escala de centenas de metros é possível e desejável para atributos com forte dependência (H+Al, T), mas a micro-heterogeneidade da argila e do P exige cautela em generalizações sobre a retenção hídrica e a disponibilidade de fósforo.
5. Políticas de conservação e manejo de castanhais naturais incorporem a dimensão espacial da fertilidade do solo como critério para definição de áreas prioritárias, reconhecendo que a produtividade e a resiliência da espécie variam significativamente em função da posição nos gradientes edáficos regionais e locais, e que diferentes regiões amazônicas apresentam padrões distintos de organização espacial que requerem estratégias específicas.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, G. B.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, A. H. N.; SOUZA, V. S. Toposequence: what are we talking about? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0230137, 2024. DOI: 10.36783/18069657rbcs20230137.

ANDRADE, V. L. C.; CLEMENT, C. R.; HERRERA-RAMÍREZ, D.; LARSEN, T.; DURGANTE, F.; BOIVIN, N. et al. Insights into growth, ring formation and maximum ages of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa) using ^{14}C dating and tree-ring analysis. **Radiocarbon**, v. 66, n. 2, p. 306-325, abr. 2024. DOI: 10.1017/RDC.2024.39.

ARAÚJO, C. F.; JUNIOR, R. O.; BELDINI, T. Multiscalar geomorphometric generalization to delineate soil textural patterns on Amazon watersheds landscapes. In: CARVALHO JUNIOR, W. et al. (ed.). **Pedometrics in Brazil**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 15-29. (Progress in Soil Science). DOI: 10.1007/978-3-031-64579-2_2.

AZEVEDO, G. F. C. Photosynthetic parameters and growth in seedlings of Bertholletia excelsa and Carapa guianensis in response to pre-acclimation to full sunlight and mild water stress. **Acta Amazonica**, v. 44, n. 1, p. 67-77, jan./mar. 2014. DOI: 10.1590/S0044-59672014000100007.

Barbosa, Marcus Vinicius Moreira, Fernandes, Taynara Augusta, Siqueira, Guilherme Benko, de Siqueira, Flávia Lucila Tonani, de Morais, Paula Benevides, Spatial Variability of the Physicochemical Properties of Soils from Seasonally Flooded Forest Fragments on a Tropical Plain, Applied and Environmental Soil Science, 2019, 1814937, 8 pages, 2019. **https://doi.org/10.1155/2019/1814937**

BARROS, A. H. C.; LIER, Q. J. V.; MAIA, A. H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 379-391, mar./abr. 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000200009.

BATISTA, A. P. B. **Modelagem do crescimento e produção de frutos da castanheira da Amazônia**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/29037.

BATISTA, A. P. B.; MELLO, J. M.; GUEDES, M. C.; REIS, A. A. Distribuição espacial do teor de carbono em solo sob floresta nativa com presença da castanha-da-amazônia (Bertholletia excelsa Bonpl.) no Amapá, Brasil. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MENSURAÇÃO FLORESTAL, 3., 2016, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, LCF, 2016. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1065565.

BINKS, O.; CERNUŠAK, L. A.; LIDDELL, M.; BRADFORD, M.; COUGHLIN, I.; CARLE, H. et al. Forest system hydraulic conductance: partitioning tree and soil components. **New Phytologist**, v. 233, n. 4, p. 1667-1681, fev. 2022. DOI: 10.1111/nph.17895.

BONFIM NETO, A. L. **Variabilidade espacial dos atributos do solo em áreas de monocultivo e em sistema iLPF na Amazônia oriental**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural da

Amazônia / Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2024. Disponível em: https://agris.fao.org/search/en/providers/124875/records/67122b2e7f591113e2a4bda6.

BORTOLUZZI, E. C.; SANTOS, D. R.; SANTANNA, M. A. et al. Mineralogy and nutrient desorption of suspended sediments during a storm event. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 6, p. 1093-1105, jul. 2013. DOI: 10.1007/s11368-013-0692-4.

BOTHA, A. D. P.; EISENBERG, B. E. Estimation of soil water retention from clay content and cation exchange capacity values of soils. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 10, n. 3, p. 141-143, 1993. DOI: 10.1080/02571862.1993.10634659.

BRODRIBB, T. J.; FEILD, T. S. Stem hydraulic supply is linked to leaf photosynthetic capacity: evidence from New Caledonian and Tasmanian rainforests. **Plant, Cell & Environment**, v. 23, n. 12, p. 1381-1388, dez. 2000.

BRUAND, A.; HARTMANN, C.; LESTURGEZ, G. Physical properties of tropical sandy soils: a large range of behaviours. In: HARTMANN, C.; CHINABUT, N. (ed.). **Management of tropical sandy soils for sustainable agriculture: a holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics**. Bangkok: FAO, 2005. p. 148-158. (Symposium on Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture, 1., Khon Kaen, 2005).

CAETANO ANDRADE, V. L.; CLEMENT, C. R.; HERRERA-RAMÍREZ, D. et al. Insights into growth, ring formation and maximum ages of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa) using ^{14}C dating and tree-ring analysis. **Radiocarbon**, v. 66, n. 2, p. 306-325, abr. 2024. DOI: 10.1017/RDC.2024.39.

CAETANO ANDRADE, V. L.; FLORES, B. M.; LEVIS, C.; CLEMENT, C. R.; ROBERTS, P.; SCHÖNGART, J. Growth rings of Brazil nut trees (Bertholletia excelsa) as a living record of historical human disturbance in Central Amazonia. **PLoS ONE**, v. 14, n. 4, e0214128, abr. 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0214128.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, set./out. 1994.

CAVALCANTE, E. A. **Caracterização física e química do solo sob dois castanhais nativos e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um solo sob floresta ombrófila densa**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

CHIRIBOGA-ARROYO, F.; JANSEN, M.; BARDALES-LOZANO, R.; ISMAIL, S. A.; THOMAS, E.; GARCÍA, M.; CORVERA GOMRINGER, R.; KETTLE, C. J. Genetic threats to the forest giants of the Amazon: habitat degradation effects on the socio-economically important Brazil nut tree (Bertholletia excelsa). **Plants, People, Planet**, v. 3, n. 2, p. 194-210, mar. 2021. Disponível em: https://hdl.handle.net/10568/110859.

COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Atributos do solo relacionados com a produção da castanheira-do-brasil (Bertholletia excelsa). **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20150042, 2017.

CUEVAS, E. Biology of the belowground system of tropical dry forests. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (ed.). **Seasonally Dry Tropical Forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 362-383. DOI: 10.1017/CBO9780511753398.015.

DA COSTA, K. C. P.; CARVALHO GONÇALVES, J. F.; GONÇALVES, A. L. et al. Advances in Brazil nut tree ecophysiology: linking abiotic factors to tree growth and fruit production. **Current Forestry Reports**, v. 8, n. 1, p. 90-110, mar. 2022. DOI: 10.1007/s40725-022-00158-x.

DARELA-FILHO, J. P.; RAMMIG, A.; FLEISCHER, K.; REICHERT, T.; LUGLI, L. F.; QUESADA, C. A.; HURTARTE, L. C. C.; PAULA, M. D.; LAPOLA, D. M. Reference maps of soil phosphorus for the pan-Amazon region. **Earth System Science Data**, v. 16, n. 1, p. 715-729, jan. 2024. DOI: 10.5194/essd-16-715-2024.

ESCOLAR, R. P.; LÓPEZ, M. L. Availability of moisture in aggregates of various sizes in a typical Ultisol and a typical Oxisol of Puerto Rico. **The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**, v. 53, n. 3, p. 207-216, jul. 1969.

FIGUEIREDO, S. P. R.; BARBOSA, B. V.; SIQUEIRA, R. M.; SIGNORI-MÜLLER, C.; TEODORO, G. S. et al. Anatomical and physiological adjustments reveal mechanisms of drought response in seedlings. **Flora**, v. 331, 152824, out. 2025. DOI: 10.1016/j.flora.2025.152824.

FRARE, J. C. V.; RAMOS, S. J. **Qualidade do solo e dinâmica de crescimento de espécies florestais e frutíferas em sistemas agroflorestais sem queima na Amazônia**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2024. Disponível em: https://agris.fao.org/search/en/providers/124875/records/67122b2f7f591113e2a4bdf7.

Fuchslueger, L., Pires Martins, N., Figueiredo Lugli, L., Souza, C. C., Santana, F., Marinho, N., Pires, M., Hartley, I., Norby, R., and Quesada, C. A. and the AmazonFACE team: Going deeper underground – unravelling microbial activity and carbon cycling in deep soils in the Central Amazon, EGU General Assembly 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-21795, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-21795, 2026.

FUJII, K.; SHIBATA, M.; KITAJIMA, K.; ICHIE, T.; KITAYAMA, K.; TURNER, B. L. Plant–soil interactions maintain biodiversity and functions of tropical forest ecosystems. **Ecological Research**, v. 33, n. 1, p. 149-160, jan. 2018. DOI: 10.1007/s11284-017-1511-y.

FUNI, C. **Padrões espaciais e temporais do desmatamento na Reserva Extrativista do Rio Cajari**. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2009.

FYLLAS, N. M.; GLOOR, E.; MERCADO, L. M.; SITCH, S.; QUESADA, C. A.; DOMINGUES, T. F.; GALBRAITH, D. R.; TORRE-LEZAMA, A.; VILANOVA, E.; RAMÍREZ-ANGULO, H.; HIGUCHI, N.; NEILL, D. A.; SILVEIRA, M.; FERREIRA, L.; AYMARD C., G. A.; MALHI, Y.; PHILLIPS, O. L.; LLOYD, J. Analysing Amazonian forest productivity using a new individual and trait-based model (TFS v.1). **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 4, p. 1251-1269, jul. 2014. DOI: 10.5194/gmd-7-1251-2014.

GOMES, R. M.; PONTE, N. H. T. Estrutura, sucessão ecológica e dispersão de sementes de árvores emergentes na RDS do Iratapuru, Amapá. **Revista FT**, v. 29, n. 143, p. 23-40, 2025. DOI: 10.69849/revistaft/ar10202506082319.

GUEDES, M. C. et al. Estrutura populacional, dinâmica da produção de frutos e produtividade. In: **Capítulo 4**. p. 99-128, 2023. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1155607.

GUEDES, M. C.; TONINI, H.; WADT, L. H. O.; SILVA, K. E. Instalação e medição de parcelas permanentes para estudos com produtos florestais não madeireiros. In: WADT, L. H. O.; SANTOS, L. M. H.; BENTES, M. P. M.; OLIVEIRA, V. B. (ed.). **Produtos florestais não madeireiros: guia metodológico da Rede Kamukaia**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 13-32.

GUERREIRO, Q. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; SANTOS, G. R.; RUIVO, M. L. P.; BELDINI, T. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, K. E.; GUEDES, M. C.; SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 237-250, jan. 2017. DOI: 10.5897/AJAR2016.11766.

HO, V. H.; MORITA, H.; HO, T. H. et al. Comparison of geostatistics, machine learning algorithms, and their hybrid approaches for modeling soil organic carbon density in tropical forests. **Journal of Soils and Sediments**, v. 25, n. 4, p. 1554-1577, abr. 2025. DOI: 10.1007/s11368-025-04027-5.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92 p. (Série manuais técnicos em Geociências, n. 1).

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

ISLAM, M.; RAHMAN, M.; BRÄUNING, A. Long-term wood anatomical time series of two ecologically contrasting tropical tree species reveal differential hydraulic adjustment to climatic stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, p. 412-423, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.037.

IVANOV, G. B. **Influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de Bertholletia excelsa H.B.K.** 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8692.

KIRSTEN, M.; MIKUTTA, R.; VOGEL, C. et al. Iron oxides and aluminous clays selectively control soil carbon storage and stability in the humid tropics. **Scientific Reports**, v. 11, 5076, mar. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-84777-7.

KOTOWSKA, M. M.; HERTEL, D.; RAJAB, Y. A.; BARUS, H.; SCHULDT, B. Patterns in hydraulic architecture from roots to branches in six tropical tree species from cacao agroforestry and their relation to wood density and stem growth. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 191, abr. 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00191.

LAMBOOY, A. M. Relationship between cation exchange capacity, clay content and water retention of Highveld soils. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 1, n. 2, p. 33-38, 1984. DOI: 10.1080/02571862.1984.10634106.

LANGE, D. F.; SCHRÖTER, S. A.; LUZ, F. M.; PIRES, E.; SANTOS, Y. R.; SILVA, J. S. et al. Cycling of dissolved organic nutrients and indications for nutrient limitations in contrasting Amazon rainforest ecosystems. **Biogeochemistry**, v. 167, n. 12, p. 1567-1588, dez. 2024. DOI: 10.1007/s10533-024-01187-3.

Laurance, S. G., Laurance, W. F., Andrade, A., Fearnside, P. M., Harms, K. E., Vicentini, A., & Luizao, R. C. (2010). Influence of soils and topography on Amazonian tree diversity: a landscape-scale study. *Journal of Vegetation Science*, *21*(1), 96-106. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2009.01122.x

LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; ANDRADE, A.; FEARNSIDE, P. M.; HARMS, K. E.; VICENTINI, A.; LUIZAO, R. C. Influence of soils and topography on Amazonian tree diversity: a landscape-scale study. **Journal of Vegetation Science**, v. 21, n. 1, p. 96-106, fev. 2010. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2009.01122.x.

MEISTER, K.; ASHTON, M. S.; CRAVEN, D.; GRISCOM, H. Carbon dynamics of tropical forests. In: ASHTON, M. S.; TYRRELL, M. L.; SPALDING, D.; GENTRY, B. (ed.). **Managing forest carbon in a changing climate**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p. 51-75.

MOURA, Q. L.; OLIVEIRA, R. C.; MELEM, N. J.; GUEDES, M. C.; COSTA, P.; SANTOS, D. B. et al. Seasonal dynamics of litterfall nutrients in a native Brazil nut stand in the Tapajós National Forest, Eastern Amazon. **Revista Ambiente & Água**, v. 20, e3113, 2025. DOI: 10.4136/ambi-agua.3113.

NOVICK, K. A.; FICKLIN, D. L.; BALDOCCHI, D. et al. Confronting the water potential information gap. **Nature Geoscience**, v. 15, n. 3, p. 158-164, mar. 2022. DOI: 10.1038/s41561-022-00909-2.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; MELEM JUNIOR, N. J.; GUEDES, M. C.; GUERREIRO, Q. L. M.; SANTOS, D. B.; GUIMARÃES, Y. B. P. C.; ARAUJO, D. M. F.; FERREIRA, N. S.; MORAES, A. S. **Caracterização dos solos sob castanhais na região sul do estado do Amapá**. Macapá: Embrapa Amapá, 2021. 34 p. (Embrapa Amapá. Documentos, 106; Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 459).

OLIVEIRA, S. S. **Growth and functional characteristics of young Bertholletia excelsa plants grown in association with an N_2-fixing tree under fertilization**. 2024. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2024. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/40659.

OLIVEIRA, S. S.; COSTA, K. C. P.; LIMA, R. M.; NINA JUNIOR, A. R.; CARVALHO, J. C.; NUNES-NESI, A.; ARAÚJO, W. L.; GONÇALVES, J. F. C. *Bertholletia excelsa* saplings respond to seasonal precipitation variations by changing metabolism when fertilized with NPK in different planting systems. **Forest Ecology and Management**, v. 572, 122325, nov. 2024. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122325.

PALHETA, L. F.; SANTOS FILHO, B. G. **Respostas ecofisiológicas de plantas jovens de castanheira do Brasil (Bertholletia excelsa Bonpl.) submetidas à deficiência hídrica**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2023. Disponível em: https://agris.fao.org/search/en/providers/124875/records/67122b327f591113e2a4bef8.

PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 7, p. 683-691, ago. 2004. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.

PEREIRA, A. J.; ARAGÓN, S.; BELDINI, T.; SCOLES, R. Produção de flores e frutos de Bertholletia excelsa em ambientes florestais e desmatados do Noroeste do Pará, Brasil. **Biota Amazônia**, v. 9, n. 3, p. 1-8, jul./set. 2019.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, n. 6, p. 1415-1440, jun. 2011. DOI: 10.5194/bg-8-1415-2011.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; PATIÑO, S.; BAKER, T. R.; CZIMCZIK, C.; FYLLAS, N. M.; MARTINELLI, L.; NARDOTO, G. B.; SCHMERLER, J.; SANTOS, A. J. B.; HODNETT, M. G.; HERRERA, R.; LUIZÃO, F. J.; ARNETH, A.; LLOYD, G.; DEZZEO, N.; HILKE, I.; KUHLMANN, I.; RAESSLER, M.; BRAND, W. A.; GEILMANN, H.; MORAES FILHO, J. O.; CARVALHO, F. P.; ARAUJO FILHO, R. N.; CHAVES, J. E.; CRUZ JUNIOR, O. F.; PIMENTEL, T. P.; PAIVA, R. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, n. 5, p. 1515-1541, maio 2010. DOI: 10.5194/bg-7-1515-2010.

QUESADA, C. A.; PAZ, C.; OBLITAS MENDOZA, E.; PHILLIPS, O. L.; SAIZ, G.; LLOYD, J. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. **SOIL**, v. 6, n. 1, p. 53-88, 2020. DOI: 10.5194/soil-6-53-2020.

QUESADA, C. A.; PHILLIPS, O. L.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I.; BAKER, T. R.; PATIÑO, S.; FYLLAS, N. M.; HODNETT, M. G.; HERRERA, R.; ALMEIDA, S.; ALVAREZ DÁVILA, E.; ARNETH, A.; ARROYO, L.; CHAO, K. J.; DEZZEO, N.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; HIGUCHI, N.; HONORIO CORONADO, E.; JIMENEZ, E. M.; KILLEEN, T.; LEZAMA, A. T.; LLOYD, G.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; LUIZÃO, F. J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; NÚÑEZ VARGAS, P.; PAIVA, R.; PEACOCK, J.; PEÑUELA, M. C.; PEÑA CRUZ, A.; PITMAN, N.; PRIANTE FILHO, N.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, H.; RUDAS, A.; SALOMÃO, R.; SANTOS, A. J. B.; SCHMERLER, J.; SILVA, N.; SILVEIRA, M.; VÁSQUEZ, R.; VIEIRA, I.; TERBORGH, J.; LLOYD, J. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. **Biogeosciences**, v. 9, n. 6, p. 2203-2246, jun. 2012. DOI: 10.5194/bg-9-2203-2012.

QUINTO-MOSQUERA, H.; MORENO-HURTADO, F. Precipitation effects on soil characteristics in tropical rain forests of the Chocó biogeographical region. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 69, n. 1, p. 7813-7823, jan./jun. 2016. DOI: 10.15446/rfna.v69n1.54749.

RAMALHO, B.; DIECKOW, J.; BROWN, G. G.; SIMON, P. L.; CORRÊA, R. S. A novel sequential chemical extractions protocol to access mineral phases stabilizing organic matter in Amazonian Dark Earths (Holocene). **Quaternary International**, v. 730, 109779, fev. 2025. DOI: 10.1016/j.quaint.2025.109779.

RAUPP, S. V.; CINTRA, R. Efeito da heterogeneidade da floresta na composição de espécies de palmeiras na Amazônia Central. **Revista de Biologia Neotropical**, v. 7, n. 2, p. 13-26, jul./dez. 2010.

RIBEIRO, M. B. N.; JEROZOLIMSKI, A.; ROBERT, P.; SALLES, N. V.; KAYAPÓ, B.; PIMENTEL, T. P.; MAGNUSSON, W. E. Anthropogenic landscape in southeastern Amazonia: contemporary impacts of low-intensity harvesting and dispersal of Brazil nuts by the Kayapó indigenous people. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, e102187, jul. 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0102187.

RODRIGUES, J. R.; SOLANDER, K. C.; CROPPER, S.; NEWMAN, B. D.; COLLINS, A. D.; WARREN, J. M. et al. Soil water percolation and nutrient fluxes as a function of topographical, seasonal and soil texture variation in Central Amazonia, Brazil. **Hydrological Processes**, v. 38, n. 4, e15148, abr. 2024. DOI: 10.1002/hyp.15148.

SANTOS, R. O.; LIMA, R. B.; SOARES, R. N.; SOUZA DANTAS, B.; BRITO, A. C.; CORDEIRO, M. V. et al. Influence of the soil on the spatial structure of forest species – preliminary results in a terra firme secondary forest plot, Amapá, Brazil. **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, v. 82, n. 2, p. 179-195, jun. 2020. DOI: 10.2989/20702620.2020.1759294.

Schaap, K. J., Fuchslueger, L., Hoosbeek, M. R., Hofhansl, F., Martins, N. P., Valverde-Barrantes, O. J., ... & Quesada, C. A. (2021). Litter inputs and phosphatase activity affect the temporal variability of organic phosphorus in a tropical forest soil in the Central Amazon. *Plant and Soil*, *469*(1), 423-441. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05146-x

Schaap, K. J., Fuchslueger, L., Quesada, C. A., Hofhansl, F., Valverde-Barrantes, O., Camargo, P., & Hoosbeek, M. R. (2022). Extracellular enzyme activities in tropical soils are driven by seasonal litter input. *Biogeochemistry*, *163*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s10533-022-01009-4

SCHWENDENMANN, L.; PENDALL, E.; SANCHEZ-BRAGADO, R.; KUNERT, N.; HÖLSCHER, D. Tree water uptake in a tropical plantation varying in tree diversity: interspecific differences, seasonal shifts and complementarity. **Ecohydrology**, v. 8, n. 1, p. 1-12, jan. 2015. DOI: 10.1002/eco.1479.

SCOLES, R.; GRIBEL, R. Population structure of Brazil nut (Bertholletia excelsa, Lecythidaceae) stands in two areas with different occupation histories in the Brazilian Amazon. **Human Ecology**, v. 39, n. 4, p. 455-464, ago. 2011. DOI: 10.1007/s10745-011-9412-0.

Shimabukuro, Y., Aragao, L., & Williams, M. (2006, July). Meso-Scale Variability of Soils and Forest Canopy Properties is Connected to Geomorphologic Features in Eastern Amazonia. In *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing* (pp. 675-678). IEEE.

SILVA, A. L.; MARIANO, D. C.; EBLING, A. A.; OLIVEIRA NETO, C. F.; VIÉGAS, I. J. M.; OKUMURA, R. S. Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 1-16, 2023. DOI: 10.17765/2176-9168.2023v16n1e9417.

SILVA, C. S. **Associação da produção de frutos de Bertholletia excelsa com os atributos do solo em dois castanhais nativos na Amazônia Ocidental**. 2022. 77 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2022. Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/9417.

SILVA, C. S.; SILVA, L. M.; WADT, L. H. O.; MIQUELONI, D. P.; SILVA, K. E.; PEREIRA, M. G. Soil classes and properties explain the occurrence and fruit production of Brazil nut. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200188, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcs20210001.

SOONG, J. L.; JANSSENS, I. A.; GRAU, O. et al. Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests. **Scientific Reports**, v. 10, 2302, fev. 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-58913-8.

SOUZA, E. B.; CUNHA, A. C. **Climatologia de precipitação no Amapá e mecanismos climáticos de grande escala: resultados do Projeto REMETAP no estado do Amapá**. Macapá: IEPA, 2010.

SOUZA, J. J. L. L.; FONTES, M. P. F.; GILKES, R.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, T. S. Geochemical signature of Amazon tropical rainforest soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170192, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbcs20170192.

SOUZA, R. L. F. Padrão espacial da castanheira em floresta no sul do Amapá, Amazônia Oriental. **Revista Arquivos Científicos (IMMES)**, v. 3, n. 1, p. 67-72, 2020. DOI: 10.5935/2595-4407/rac.immes.v3n1p67-72.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 937-944, nov./dez. 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000600001.

STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O.; KAINER, K. A. et al. Comparative models disentangle drivers of fruit production variability of an economically and ecologically important long-lived Amazonian tree. **Scientific Reports**, v. 11, 2563, jan. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-81948-4.

TELLES, E. C. C.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; TRUMBORE, S. E.; COSTA, E. S.; SANTOS, J. et al. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 2, p. 1040, jun. 2003. DOI: 10.1029/2002GB001953.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N. C. A.; SABATIER, D. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. **Science**, v. 342, n. 6156, 1243092, out. 2013. DOI: 10.1126/science.1243092.

THOMAS, E.; JANSEN, M.; CHIRIBOGA-ARROYO, F.; WADT, L. H. O.; CORVERA-GOMRINGER, R.; ATKINSON, R. J.; BONSER, S. P.; VELASQUEZ-RAMIREZ, M. G.; LADD, B. Habitat quality differentiation and consequences for ecosystem service provision of an Amazonian hyperdominant tree species. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 621064, mar. 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.621064.

TOURNE, D. C. M.; BALLESTER, M. V. R.; JAMES, P. M. A.; MARTORANO, L. G.; GUEDES, M. C.; THOMAS, E. Strategies to optimize modeling habitat suitability of *Bertholletia excelsa* in the Pan-Amazonia. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 22, p. 12623-12638, nov. 2019. DOI: 10.1002/ece3.5726.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. O.; OLIVEIRA, R. P.; TEIXEIRA, W. G. Mapping soil carbon, particle-size fractions, and water retention in tropical dry forest in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1371-1385, set. 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900036.

VIANA SANTOS, H. K.; BORGES DE LIMA, R.; FIGUEIREDO DE SOUZA, R. L.; CARDOSO, D.; MOONLIGHT, P. W.; TEIXEIRA SILVA, T.; PEREIRA DE OLIVEIRA, C.; ALVES JÚNIOR, F. T.; VEENENDAAL, E.; PAGANUCCI DE QUEIROZ, L.; RODRIGUES, P. M. S.; SANTOS, R. M.; SARKINEN, T.; PAULA, A.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PENNINGTON, T.; PHILLIPS, O. L. Spatial distribution of aboveground biomass stock in tropical dry forest in Brazil. **iForest**, v. 16, n. 2, p. 116-126, abr. 2023. DOI: 10.3832/ifor4104-016.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 3. ed. Chichester: Wiley, 2007.

XU, S.; GU, C.; RODRIGUES, J. L. M.; LI, C.; BOHANNAN, B.; NÜSSLEIN, K.; MARGENOT, A. J. Soil phosphorus cycling across a 100-year deforestation chronosequence in the Amazon rainforest. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, e17077, jan. 2024. DOI: 10.1111/gcb.17077.