



Interrelações entre estoques de fósforo e propriedades edáficas em florestas ombrófilas densas do sudeste amazônico

Sara de Sousa Cardoso¹ , Jéssica Araújo Heringer Ribeiro² , Lígia Haira Duarte de Almeida³ , Anthony Barbosa da Silva⁴ ,
Deirilane Galvão de Moraes¹ , Paulo Jardel Braz Faiad³ , Wendelo Silva Costa³ , Sintia Valerio Kohler¹ , Fernando da
Costa Brito Lacerda^{1*} 

*Contato principal

¹ Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Parauapebas/PA, Brasil. <sarasousacardoso791@gmail.com, deirilane63@gmail.com, sintia.kohler@ufra.edu.br, fernando.lacerda@ufra.edu.br>

² Universidade Federal de Viçosa/UFV, Viçosa/MG, Brasil. <jessica.heringer@outlook.com>

³ Núcleo de Gestão Integrada de Carajás/NGI Carajás, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/ICMBio, Parauapebas/PA, Brasil. <hairaduarte19@gmail.com, paulo.faiad@icmbio.gov.br, wendelo.costa@icmbio.gov.br>

⁴ Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém/PA, Brasil. <anthony.barbosa@ufra.edu.br>

Como citar:

Cardoso SS, Ribeiro JAH, de Almeida LHD, da Silva AB, de Moraes DG, Faiad PJB et. al. Interrelações entre estoques de fósforo e propriedades edáficas em florestas ombrófilas densas do sudeste amazônico. Biodivers. Bras. [Internet]. 2025; 15(4): e2798. doi:10.37002/biodiversidadebrasileira.v15i4.2798

Recebido em 09/02/2025 – Aceito em 30/06/2025

RESUMO – O fósforo é um dos elementos essenciais que mais limita a produtividade primária nos ecossistemas terrestres. Sua disponibilidade está relacionada à capacidade de ciclagem e mineralização da matéria orgânica, assim como às propriedades físicas e químicas do solo. O objetivo deste trabalho foi estimar os estoques de fósforo em diferentes profundidades do solo e verificar suas relações com a acidez e com os teores de matéria orgânica, ferro, cálcio, alumínio e argila, em duas áreas de floresta ombrófila densa na Flona de Carajás. A amostragem do solo foi realizada em 11 parcelas permanentes de 2.000 m², sendo sete parcelas na localidade do Igarapé Bahia e quatro parcelas em Serra Norte. As análises químicas e físicas do solo seguiram os protocolos estabelecidos pela EMBRAPA e foram realizadas a partir de amostras compostas, provenientes da homogeneização de três subamostragens, em quatro profundidades. As hipóteses testadas foram: (i) em virtude da heterogeneidade ambiental, os teores de fósforo variam entre as localidades estudadas; (ii) as propriedades analisadas variam com a profundidade do solo; (iii) as propriedades químicas e físicas influenciam os estoques de P total e P remanescente do solo; e (iv) a influência das propriedades químicas e físicas do solo sobre a disponibilidade de fósforo varia com a profundidade. Modelos lineares mistos foram usados para analisar os dados. Os resultados confirmaram as hipóteses (i), (ii) e (iii) e refutaram a hipótese (iv). Conclui-se que as características edáficas relacionadas ao status nutricional e à textura variam entre localidades diferentes.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo; estoques de nutrientes; profundidade do solo; Serra dos Carajás.

Interrelations between phosphorus stocks and soil properties in dense ombrophilous forests of the southeastern amazon

ABSTRACT – Phosphorus is one of the essential elements that most limits primary productivity in terrestrial ecosystems. Its availability is related to the capacity for cycling and mineralization of organic matter, as well as to the physical and chemical properties of the soil. Therefore, the objective of this study was to estimate phosphorus stocks at different soil depths and to investigate their relationships with soil acidity and the contents of organic matter, iron, calcium, aluminum, and clay in two areas of dense rainforest in the Carajás National Forest. Soil sampling was carried out in 11 permanent plots of 2000 m² established in the localities of Igarapé Bahia (seven plots) and Serra Norte (four plots). The chemical and physical analyses of the soil followed the standard protocols established by EMBRAPA and were performed on composite samples resulting from the homogenization of three subsamples at four different depths. The hypotheses are that (i) due to environmental heterogeneity, phosphorus levels vary among the studied locations, (ii) the analyzed properties vary with soil depth, (iii) the chemical and physical properties influence the total phosphorus (P) and available phosphorus (P_{Rem}) stocks in the soil, and (iv) the influence of the chemical and physical properties of the soil on phosphorus availability varies with depth. Linear mixed models were used to analyze the data. The results confirmed hypotheses ‘i’, ‘ii’, and ‘iii’, while hypothesis ‘iv’ was refuted. It is concluded that soil characteristics related to nutritional status and texture vary across different locations.

Keywords: Soil organic matter; nutrient stocks; soil depth; Serra dos Carajás.

Interrelaciones entre reservas de fósforo y propiedades edáficas en bosques ombrófilos densos del sudeste amazónico

RESUMEN – El fósforo es uno de los elementos esenciales que más limita la productividad primaria de los ecosistemas terrestres. Su disponibilidad está relacionada con la capacidad de ciclado y mineralización de la materia orgánica, así como con las propiedades físicas y químicas del suelo. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue estimar los stocks de fósforo en diferentes profundidades del suelo y verificar sus relaciones con la acidez y con los contenidos de materia orgánica, hierro, calcio, aluminio y arcilla, en dos áreas de bosque ombrófilo denso en la FLONA de Carajás. La muestreo de suelo se realizó en 11 parcelas permanentes de 2000 m² establecidas en las localidades de Igarapé Bahia (siete parcelas) y Serra Norte (cuatro parcelas). Los análisis químicos y físicos del suelo siguieron los protocolos estándar establecidos por la EMBRAPA y se realizaron a partir de muestras compuestas derivadas de la homogenización de tres submuestras en 4 profundidades. Las hipótesis son que (i) debido a la heterogeneidad ambiental, los niveles de fósforo varían entre las localidades estudiadas, (ii) las propiedades analizadas varían con la profundidad del suelo, (iii) las propiedades químicas y físicas influyen en los stocks de fósforo total (P) y fósforo disponible (P_{Rem}) del suelo, y (iv) la influencia de las propiedades químicas y físicas del suelo sobre la disponibilidad de fósforo varía con la profundidad. Se utilizaron modelos lineales mixtos para analizar los datos. Los resultados confirmaron las hipótesis ‘i’, ‘ii’ y ‘iii’, mientras que la hipótesis ‘iv’ fue refutada. Se concluye que las características edáficas relacionadas con el estado nutricional y la textura varían en diferentes localidades.

Palabras clave: Materia orgánica del suelo; stocks de nutrientes; profundidad del suelo; Serra dos Carajás.

Introdução

A Floresta Nacional de Carajás (FLONA de Carajás) pertence a um mosaico de unidades de conservação (UCs), reconhecida pela grande biodiversidade e alto endemismo [1]. Está localizada na região amazônica brasileira, no sudeste do estado do Pará [1]. A FLONA de Carajás é composta por diferentes formações vegetacionais, com predomínio de florestas ombrófilas [2][3]. Essas formações de florestas ombrófilas desempenham importantes serviços ecossistêmicos que atuam em escala local, regional e global, sobretudo os relacionados à ciclagem de carbono, nutrientes e água [4]. Grande parte desses serviços está diretamente relacionada à produtividade primária e aos padrões da biodiversidade nesses ecossistemas florestais [1], o que, por sua vez, se associa frequentemente às condições edáficas disponíveis [3].

O solo é o principal meio para o crescimento das plantas, e suas propriedades químicas e físicas são consideradas um dos principais fatores que influenciam a produtividade primária nos ecossistemas terrestres [5]. Conceitualmente, constitui uma camada de material biologicamente ativo, resultante de transformações complexas que envolvem o intemperismo de rochas e minerais, a ciclagem de nutrientes e a produção e decomposição de biomassa [5]. Dentre as propriedades químicas, o fósforo é considerado globalmente um dos nutrientes que mais limita o crescimento das plantas [4][6]. Em ecossistemas tropicais, a disponibilidade desse elemento no solo está relacionada ao intemperismo de rochas fosfáticas [7], à acidez [8], aos gradientes de concentração de alumínio e cálcio [9][5][10], e à ciclagem da matéria orgânica [11]. Diversos estudos demonstraram que, quanto maior a disponibilidade de fósforo, maior a densidade e a diversidade de espécies vegetais [12][13][4], e, consequentemente, maior é a promoção de serviços ecossistêmicos em florestas tropicais [4]. Contudo, os padrões de distribuição espacial, bem como os fatores que influenciam a disponibilidade de fósforo nos solos de florestas tropicais, ainda não foram completamente elucidados.

O fósforo pode ser encontrado em diferentes formas na natureza, sendo a maior parte presente nas rochas, no solo e nos organismos vivos [14]. O fósforo total do solo (P lábil e não-lábil) é composto por P orgânico, P adsorvido aos coloides e P precipitado, que se forma por meio de uma reação físico-química de cristalização [15]. Para tornar-se disponível às plantas, o P orgânico necessita ser mineralizado pela flora microbiana do solo; o P adsorvido precisa ser liberado dos sítios de adsorção; e os precipitados de P precisam ser dissolvidos [16]. Esses processos ocorrem de forma heterogênea em ecossistemas naturais, gerando a ocorrência de diferentes gradientes de fertilidade [17].

É sabido que, nos ecossistemas tropicais, grande parte do fósforo no solo encontra-se indisponível para as plantas, devido à sua adsorção aos óxidos de ferro e de alumínio [10], assim como por sua interação com o cálcio [18]. Isso faz com que, mesmo que os teores de fósforo total sejam relativamente elevados, as frações biodisponíveis se mantenham limitantes no solo [19]. Diante disso, a determinação dos teores de fósforo remanescente (Prem), que está correlacionada à capacidade máxima de adsorção e tampão de fosfatos, pode ser utilizada para medir de forma mais eficiente a disponibilidade de fósforo no solo [20][8]. Cabe ressaltar que a matéria orgânica do solo frequentemente promove a redução da adsorção do fósforo que ocorre na superfície das argilas e óxidos de ferro e alumínio, devido ao bloqueio de sítios de adsorção por ação de substâncias húmicas, favorecendo o aumento nos teores de Prem [21], o que, consequentemente, promove uma maior diversidade de espécies vegetais nesses ecossistemas [20].

Em geral, a cobertura vegetal é o principal fator contribuidor para a incorporação de matéria orgânica no solo [4]. Essa incorporação ocorre principalmente pela decomposição da serrapilheira e pelo turnover das raízes e micorrizas [22]. A decomposição e mineralização dos compostos orgânicos é realizada pelos microrganismos do solo, que utilizam esses recursos para o seu fornecimento energético [23]. A dinâmica da comunidade microbiana do solo, e consequentemente das taxas de mineralização e disponibilização de nutrientes, é

determinada por fatores bióticos e abióticos que variam temporal e espacialmente nos ecossistemas [19]. Dentre os fatores abióticos, temperatura, umidade e a acidez do solo são considerados preponderantes [24]. Esses fatores interagem com os fatores bióticos, que incluem a estrutura e composição da vegetação, que, por sua vez, atua na geração de compostos orgânicos em diferentes quantidades e composição química [25]. Considerando que os processos biogeoquímicos relacionados à ciclagem de nutrientes ocorrem de forma mais intensa nas camadas superficiais do solo, é provável que a profundidade também exerça forte influência na biodisponibilidade de fósforo.

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho foi estimar os estoques de fósforo (total-P e remanescente-Prem) do solo em formações de florestas ombrófila densa em duas localidades diferentes na FLONA de Carajás, sudeste do estado do Pará. Nossas hipóteses são que: (i) em virtude da heterogeneidade ambiental, os teores de fósforo variam entre as localidades estudadas; (ii) as propriedades analisadas variam com a profundidade do solo; (iii) as propriedades químicas (teor de matéria orgânica, Fe^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , pH) e física (argila) influenciam os estoques de P e Prem do solo; e (iv) que a influência das propriedades químicas e físicas do solo sobre a disponibilidade de fósforo varia com a profundidade.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na FLONA de Carajás, localizada no município de Parauapebas, no sudeste do estado do Pará. A FLONA constitui uma UC criada especificamente para promover o uso múltiplo e sustentável dos recursos florestais, bem como o desenvolvimento de pesquisas científicas com ênfase na conservação da biodiversidade [1]. A FLONA possui uma área contínua de 411.948,87 ha, com predomínio fitofisionômico de floresta ombrófila densa, além de ocorrência de manchas de campos rupestres ferruginosos sobre substrato de canga [26]. Este estudo foi devidamente autorizado pelo Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (Sisbio nº 78930-1).

O clima da região de Carajás caracteriza-se como tropical quente e úmido, e se enquadra no tipo Aw de transição, segundo a classificação de Köppen [27]. Em geral, ao longo do ano, apresentam-se duas estações bem definidas: o verão chuvoso, entre os meses de novembro e abril; e o inverno seco, entre os meses de maio e outubro. A precipitação regional é de 2.033 mm por ano, e a temperatura média mensal na FLONA de Carajás varia entre 25,1 °C e 26,3 °C [3]. Os solos são predominantemente do tipo Argissolos Vermelho-Amarelo e Latossolos Vermelho [28].

Especificamente, o estudo foi realizado em duas áreas distintas de floresta ombrófila densa: Igarapé Bahia (IGB) e Serra Norte (SRN). A principal diferença entre essas áreas está na proximidade da Serra Norte com os campos rupestres ferruginosos, sobretudo com os corpos minerais de N1 e N2, que estão em atividade ou em prospecção de lavra mineral (Figura 1). Segundo Corrêa (2011), em SRN, as concreções ferruginosas derivadas de alterações de rochas máficas geraram uma grande concentração de goethita, e, em certos casos, um predomínio de hematita nos solos. No Igarapé Bahia, os solos são derivados da formação Águas Claras, com predominância de rochas areníticas [29]. Nessas áreas, foram estabelecidas um total de 11 parcelas permanentes, sendo sete parcelas na região do Igarapé Bahia e quatro parcelas em Serra Norte. Cada parcela permanente possui uma área retangular de 2.000 m² (20 m x 100 m).

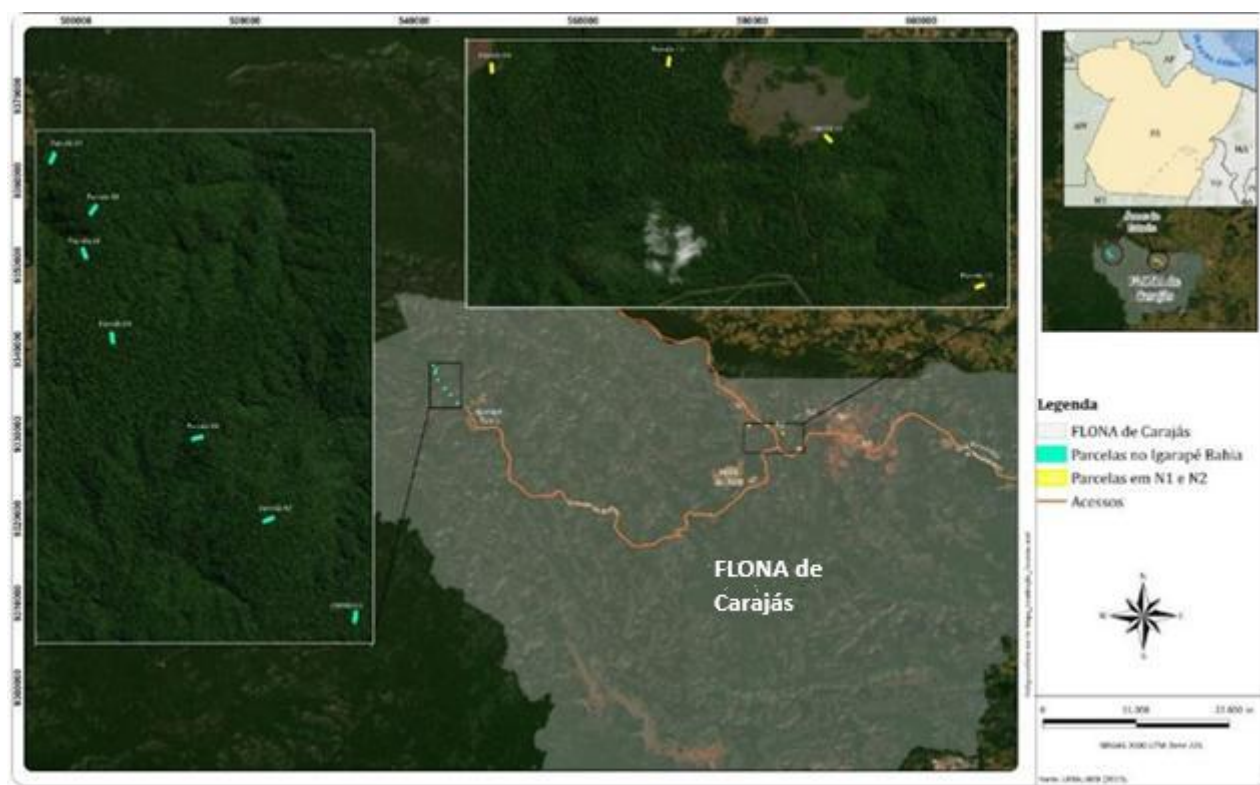


Figura 1 — Mapa da área de estudo, mostrando a distribuição das parcelas permanentes estabelecidas nas formações de floresta ombrófila densa da Floresta Nacional de Carajás. As sete parcelas da região do Igarapé Bahia e as três parcelas em Serra Norte.

Coleta de dados

A estimativa dos teores de matéria orgânica (MOS) e das demais propriedades químicas (alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], cálcio [Ca^{2+}], fósforo total [P] e fósforo remanescente [Prem], e pH) e físicas (teor de argila) do solo seguiu os protocolos usuais estabelecidos pela EMBRAPA para solos brasileiros [20]. Para isso, foram coletadas amostras compostas, resultantes da homogeneização de três subamostragens realizadas, respectivamente, no início, meio e fim de cada parcela, considerando as profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm.

Análise estatística

A influência da localidade (SRN e IGB) nas propriedades edáficas analisadas foi explorada utilizando modelos lineares de efeitos mistos (LMER), com a profundidade (PRF) do solo como fator de agrupamento (ou seja, *lmer (propriedade edáfica ~ localidade + (1 | PRF), dados)*). Posteriormente, foi empregado o LMER para verificar a influência da profundidade nas propriedades edáficas analisadas, utilizando a localidade como fator de agrupamento (ou seja, *lmer (propriedade edáfica ~ PRF + (1 | localidade), dados)*).

A análise de LMER também foi utilizada para verificar a influência dos teores de matéria orgânica (MOS), alumínio (Al^{3+}), ferro (Fe^{2+}), cálcio (Ca^{2+}), pH e argila sobre os estoques de fósforo total (P) e remanescente (Prem), bem como suas interações com a profundidade do solo (ou seja, *lmer(estoque de fósforo ~ PRF * MOS + PRF * Fe^{2+} + PRF * Ca^{2+} + PRF * Al^{3+} + PRF * pH + PRF * argila + (1 | Localidade), dados)*).

Todas as análises foram realizadas no R 3.0.2 [30], utilizando o pacote estatístico *lme4* para os modelos lineares de efeitos mistos e *multcomp* para os testes simultâneos de hipóteses lineares gerais.

Resultados

As concentrações de matéria orgânica e de Fe^{2+} foram mais elevadas na localidade Serra Norte (SRN) (Figuras 2A e 2D), enquanto as concentrações de Prem e argila foram mais elevadas na localidade Igarapé Bahia (IGB) (Figuras 1C e 1H). Os teores de P, Ca^{2+} , Al^{3+} e o pH do solo não diferiram entre as duas localidades analisadas (Figuras 2B, 2E, 2F e 2G).

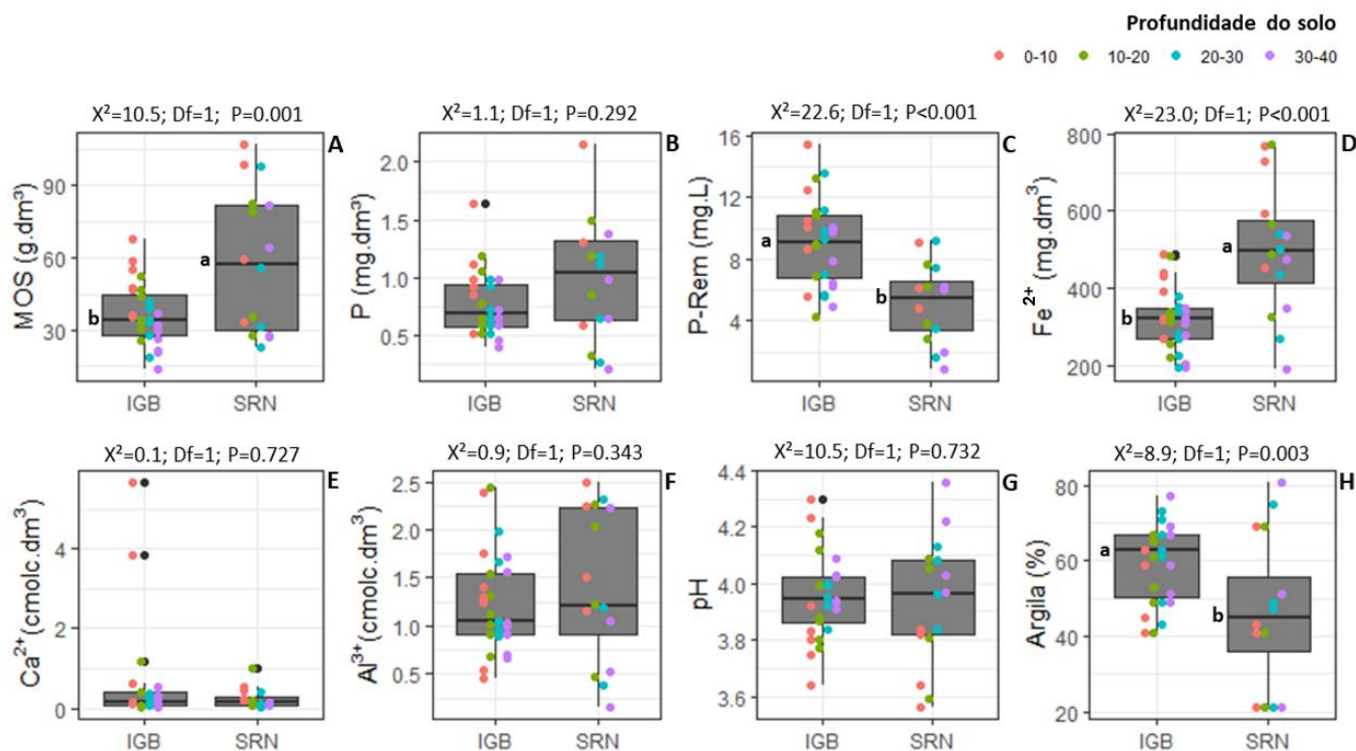


Figura 2 – Concentrações de matéria orgânica (MOS) e das demais propriedades químicas (alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], Cálcio [Ca^{2+}], fósforo total [P] e remanescente [Prem] e pH) e física (argila) do solo em duas localidades de formações de Floresta Ombrófila Densa (Serra Norte-SRN e Igarapé Bahia-IGB) na FLONA de Carajás. Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as localidades analisadas.

A profundidade do solo influenciou significativamente a maioria das variáveis analisadas. As camadas de 0-10 cm e 30-40 cm apresentaram, respectivamente, as maiores e menores concentrações de MOS, P, Fe^{2+} e Ca^{2+} , ao passo que as camadas de 10-20 cm e 20-30 cm exibiram concentrações intermediárias. De forma inversa, o pH do solo aumentou com a profundidade, sendo que as camadas de 0-10 cm e 30-40 cm apresentaram diferenças significativas, enquanto as demais camadas exibiram valores intermediários, sem diferenças significativas entre si. Os teores de fósforo remanescente (Prem), Al^{3+} e argila não variaram significativamente entre as profundidades (Tabela 1).

Tabela 1 – Concentrações de matéria orgânica (MOS) e das demais propriedades químicas (alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], cálcio [Ca^{2+}], fósforo total [P] e remanescente [Prem], e pH) e física (argila) do solo, em quatro profundidades diferentes (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm), em solos de formações de floresta ombrófila densa na FLONA de Carajás.

	Profundidade do solo				Modelos mistos		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	X ²	Df	P
MOS (g.dm ³)	58.81±7.40 ^a	44.78±5.92 ^{ab}	38.36±6.80 ^b	34.78±6.16 ^b	13.32	3	0.004
P (mg.dm ³)	1.20±0.17 ^a	0.84±0.10 ^{ab}	0.74±0.08 ^{ab}	0.68±0.10 ^b	9.63	3	0.022
P _{Rem} (mg.L)	9.10±1.07	7.67±0.99	7.64±1.04	6.19±0.86	6.58	3	0.086
Fe ²⁺ (mg.dm ³)	471.94±49.22 ^a	401.39±48.98 ^{ab}	344.94±33.72 ^{ab}	322.15±33.29 ^b	12.26	3	0.007
Al ³⁺ (cmolc.dm ³)	1.50±0.21	1.37±0.19	1.23±0.17	1.05±0.18	3.22	3	0.359
Ca ²⁺ (cmolc.dm ³)	1.10±0.56 ^a	0.39±0.14 ^{ab}	0.17±0.04 ^{ab}	0.15±0.05 ^b	9.36	3	0.025
pH	3.85±0.07 ^b	3.92±0.05 ^{ab}	3.97±0.03 ^{ab}	4.05±0.04 ^a	8.74	3	0.033
Argila (%)	51.91±4.43	52.09±4.54	56.27±4.90	59.36±5.25	2.01	3	0.571

Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística entre as profundidades analisadas.

O fósforo total (P) apresentou interações estatísticas significativas com as concentrações de MOS, Fe²⁺, Ca²⁺, Al³⁺ e argila. O fósforo remanescente (Prem), por sua vez, interagiu significativamente com as concentrações de MOS, Al³⁺ e argila (Tabela 2). Essas interações não apresentaram influência significativa da profundidade do solo. O pH não apresentou interação significativa com nenhuma das duas formas de fósforo analisadas (Tabela 2). Essas interações podem ser melhor visualizadas na Figura 3, onde se observa uma relação geral positiva entre os estoques de P e MOS, Fe²⁺, Ca²⁺ e Al³⁺. A representação gráfica também demonstra relações negativas do P com a argila, bem como do Prem com a MOS e o Al³⁺.

Tabela 2 – Resultados dos modelos mistos utilizados para avaliar os efeitos das propriedades edáficas analisadas (alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], cálcio [Ca^{2+}], pH e argila) sobre os estoques de fósforo total (P) e remanescente (Prem), bem como suas interações com a profundidade (PRF) do solo em formações de floresta ombrófila densa na FLONA de Carajás.

Modelos mistos		X ²	Df	P	Modelos mistos		X ²	Df	P
P~	MOS	7.42	1	0.006	P _{Rem} ~	MOS	5.49	1	0.019
	Fe ²⁺	5.66	1	0.017		Fe ²⁺	1.81	1	0.179
	Ca ²⁺	5.01	1	0.025		Ca ²⁺	0.19	1	0.662
	Al ³⁺	3.97	1	0.046		Al ³⁺	8.58	1	0.003
	pH	0.00	1	0.987		pH	2.86	1	0.091
	Argila	56.54	1	p<0.001		Argila	10.09	1	0.001
	PRF × MOS	6.88	3	0.076		PRF × MOS	1.70	3	0.636
	PRF × Fe ²⁺	4.45	3	0.217		PRF × Fe ²⁺	0.23	3	0.973
	PRF × Ca ²⁺	0.95	3	0.813		PRF × Ca ²⁺	3.50	3	0.321
	PRF × Al ³⁺	2.93	3	0.402		PRF × Al ³⁺	0.77	3	0.856
	PRF × pH	1.83	3	0.609		PRF × pH	1.39	3	0.708
	PRF × Argila	2.12	3	0.548		PRF × Argila	1.96	3	0.581

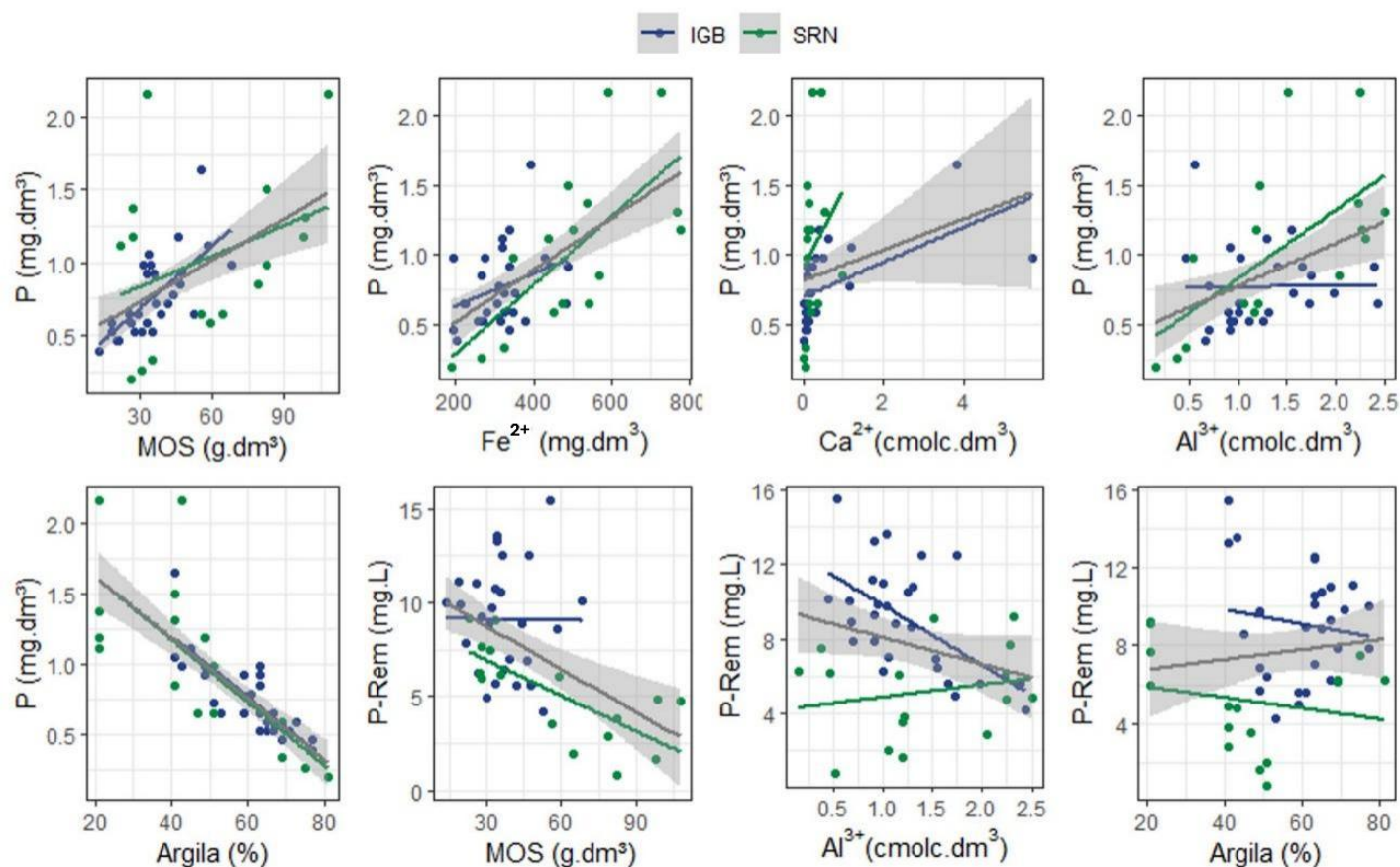


Figura 3 – Relações significativas entre os estoques de fósforo (P e Prem) e demais propriedades edáficas (matéria orgânica [MOS], alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], cálcio [Ca^{2+}] e argila) em duas localidades de floresta ombrófila densa (Igarapé Bahia - IGB e Serra Norte - SRN) na FLONA de Carajás. A linha azul indica as tendências dos dados em IGB, a linha verde indica as tendências em SRN, e a linha cinza representa a tendência geral considerando ambas as localidades juntas.

Discussão

Apesar de o estoque de P total não ter variado entre as duas localidades avaliadas, verificamos que o Prem foi significativamente maior em Igarapé Bahia (IGB) em relação à Serra Norte (SRN) (Figura 2), provavelmente devido às variações ambientais presentes nessas duas localidades, o que corrobora a primeira hipótese deste estudo. IGB apresentou concentrações menores de ferro (Figura 2), o que pode ter contribuído para o aumento dos teores de Prem nessa localidade. Diversos estudos demonstraram que os óxidos de ferro e a matéria orgânica são constituintes do solo que afetam mais intensamente as reações e a taxa de adsorção de fósforo [9]. A adsorção de fosfato na solução do solo por óxidos de ferro resulta na formação de complexos superficiais com ligações covalentes, o que acentua o processo de adsorção de fósforo [9][8][31][32][33]. SRN apresentou maiores concentrações de matéria orgânica (Figura 2), o que pode ter contribuído para o menor teor de Prem (Figura 2). A MOS pode influenciar positiva ou negativamente a disponibilidade de fósforo por meio da mineralização no solo, podendo tanto adsorvê-lo quanto bloquear os sítios de adsorção que ocorrem nas superfícies das argilas e

dos óxidos de ferro e alumínio [34]. Estudos demonstraram que a MOS pode aumentar a adsorção, acentuando a fixação de fósforo nos colóides do solo, reduzindo, assim, a disponibilidade de P na solução [19][35].

Corroborando nossa segunda hipótese, a maioria das propriedades edáficas analisadas variou com a profundidade do solo, o que provavelmente está relacionado a diferentes processos biogeoquímicos [36]. De forma geral, a profundidade de 0-10 cm apresentou as maiores concentrações de MOS e de P em relação às camadas mais profundas, indicando melhores condições nutricionais na superfície do solo nas áreas florestais estudadas. É reconhecido que a produção e a decomposição da serrapilheira são algumas das principais vias de incorporação de matéria orgânica no solo [37]. Assim, as camadas mais superficiais, que têm contato direto com a serrapilheira, podem acumular maior concentração de compostos orgânicos [38], além de apresentar maior dinâmica na comunidade microbiana, o que favorece uma maior ciclagem e disponibilidade nutricional [39]. Esse fato explica a maior concentração de MOS e de P total nas primeiras camadas do solo.

Cabe ressaltar que a maior concentração de MOS na superfície pode gerar maior acidez, devido à liberação de ácidos orgânicos [19], o que se torna ainda mais relevante em solos distróficos, que costumam apresentar maiores concentrações de alumínio e menores de cálcio [19]. Esse fator explica o gradativo aumento do pH com o aumento da profundidade (Tabela 1). Deve-se considerar também que o processo de lixiviação desloca muitos nutrientes para camadas mais profundas [40], o que explica, pelo menos parcialmente, os teores similares de Prem entre as diferentes profundidades analisadas.

Corroborando nossa terceira hipótese, verificamos que os estoques de fósforo analisados são influenciados por propriedades químicas e físicas do solo, especialmente pelas concentrações de MOS, Fe^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} e argila. A MOS interagiu com os estoques de fósforo total e remanescente; no entanto, as tendências das relações entre essas variáveis foram diferentes: com o P total, a MOS apresentou uma relação de tendência positiva; enquanto com o Prem, a tendência foi negativa. Segundo Ibia & Udo (1993), a MOS desempenha um papel ambivalente em relação à disponibilidade de P, visto que, assim como pode bloquear sítios de adsorção, também pode gerar efeito adsortivo sobre esse nutriente, o que explica sua relação antagônica com o P total e o Prem em nosso estudo (Figura 3).

O Al^{3+} apresentou uma relação geral de tendência negativa com o Prem. Estudos demonstraram que altas concentrações de alumínio podem causar desequilíbrio de nutrientes no solo, provocando limitações, especialmente do fósforo [41][42]. Esse fato ocorre devido à elevada capacidade de troca catiônica presente em solos altamente intemperizados [5]. Essas condições favorecem a ocorrência de minerais de óxidos de ferro e alumínio, que têm alta capacidade de reter o Prem, devido à sua elevada área superficial específica e à baixa cristalinidade [41].

Contrariando as expectativas, o P total apresentou relações de tendência positiva com Fe^{2+} e Al^{3+} . Isso, contudo, é mais evidente na localidade de Serra Norte (SRN) (Figura 3), indicando que os dados dessa localidade influenciam a tendência geral dos resultados para essas variáveis. As parcelas permanentes estabelecidas em SRN estão localizadas próximas a formações de campos rupestres que ocorrem sob substrato de canga (Figura 1). Nessa localidade, a concentração de ferro no solo é bem maior do que em Igarapé Bahia (Figura 2), resultado dos distintos processos de formação dos solos. É provável que essa condição edáfica peculiar de SRN tenha gerado mecanismos adsortivos e de disponibilização de fósforo diferenciados em relação a outros ecossistemas tropicais, onde a influência do ferro não é tão marcante. Isso, no entanto, merece ser mais bem investigado em estudos futuros.

Apesar de termos verificado uma interação significativa entre o Prem e o teor de argila, a tendência dessa relação não ficou clara na análise gráfica (Figura 3). Contudo, já está bem documentado na literatura o efeito

adsorvente que as argilas exercem sobre o fósforo, especialmente nas frações de óxidos de Fe e Al [4][9][5], o que provavelmente é o fator responsável pela interação observada.

Além disso, observamos que o cálcio teve uma interação significativa com o P total. Nesse sentido, sabe-se que o cálcio desempenha um papel importante na redução da acidez do solo, pois atua na neutralização do alumínio trocável, possibilitando um aumento na capacidade de troca catiônica (CTC) [4]. Assim, áreas com maior quantidade de Ca^{2+} podem estocar maior quantidade de fósforo, principalmente devido à redução dos processos adsorptivos [4]. Complementarmente, o aumento da CTC em áreas com maior quantidade de cálcio possibilita uma maior disponibilidade nutricional, o que contribui para uma maior produtividade primária [43]. Isso pode gerar uma maior quantidade de compostos orgânicos recicláveis no solo, aumentando os estoques de nutrientes como o fósforo [43].

Por fim, verificamos que não houve interação significativa das propriedades químicas e físicas do solo na variação do P total e do Prem em relação às profundidades, o que refuta nossa última hipótese. Isso indica que os processos biogeoquímicos estão ocorrendo de forma similar entre as camadas estudadas. Talvez a profundidade de 0-40 cm não tenha sido suficiente para provocar grandes variações nos processos interativos observados neste estudo. Em geral, os solos amazônicos são bastante profundos, e a profundidade de 0-40 cm pode ser considerada uma camada superficial, onde os processos biogeoquímicos, como a mineralização microbiana, ocorrem de forma mais homogênea. Assim, recomendamos que, em estudos futuros, sejam consideradas profundidades maiores ao longo do perfil do solo.

Conclusão

Na Serra dos Carajás, as características edáficas relacionadas ao status nutricional e textura, variam em localidades diferentes sob mesma condição climática, tipo de solo, relevo, influência da paisagem e cobertura florestal. Áreas com maior influência do ferro (próximas das cangas) apresentam menores estoques de fósforo, mas maiores concentrações de matéria orgânica, o que parece garantir o suprimento nutricional necessário para a manutenção da fitofisionomia florestal densa. O status nutricional e a acidez do solo variam consideravelmente com a profundidade, sendo as camadas superficiais mais férteis e ácidas, o que está relacionado a um maior acúmulo de matéria orgânica. Propriedades químicas e física do solo podem influenciar os estoques de fósforo, contudo o efeito interativo pode variar com a localidade e com a forma de fósforo analisada.

Referências

1. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Plano de pesquisa geossistemas ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás. Brasília; Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade; 2017.: [acesso em 18 de mar 2024] Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br>.
2. INÁCIO PA. Dos sistemas ambientais à geoecologia das paisagens: Florestas e campos ferruginosos em Carajás, PA [Dissertação]. Fortaleza: Universidade federal do Ceará; 2023.
3. Viana LP, Mota OFN, Gil BSA, Salino A, Zappi CD, Harley MR et al. Flora das Cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: história, área de estudos e metodologia. Rodriguésia. 2016 nov; 67(5): 1107-1124. doi:10.1590/2175-7860201667501.
4. Moreira JE, Fátima MS, CARES ZR; STURMER LS; O ecossistema do solo. editora UFLA ed.1, Minas Gerais; 2013.
5. Resende M, Curi N, Rezende BS, Corrêa, FG. Pedologia – Base para distinção de ambiente. editora UFLA ed. 5, Minas Gerais; 2007.
6. Pellegrini AFA, Nutrient limitation in tropical savannas across multiple scales and mechanisms. Ecology. 2016 mar; 97: 313–324. doi:10.1890/15-0869.1

7. Yamada T, Abdalla SRS. Fósforo na Agricultura Brasileira. Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato. ed.2. São Paulo: Piracicaba; 2004.
8. Rampim L, Lana CM, Frandoloso FJ. Available phosphorus and sulphur, exchangeable aluminum and remaining phosphorus in rhodic eutrudox submitted to gypsum cultivated with wheat and soybean. *Semina: Ciências Agrárias*. [internet] 2013 ago-set [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 34(4): 1623-1638. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133323432>.
9. Fink RJ, Inda VA, Tiecher T, Barrón V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciência e agrotecnologia*. [internet] 2016 jul-aug [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 40(4): 369-379. Disponível: <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>.
10. Resende JCF, Markewitz DKCA, Bustamante MMC, Davidson EA. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning. *Biogeochemistry*. 2010 outubro; 105: 105-118. doi:10.1007/s10533-010-9531-5
11. Saraiva RCA, Fisch VTS, Toledo BCM. Influências edáfica e topográfica sobre a comunidade de palmeiras da floresta ombrófila densa Montana, Parque Estadual da Serra do Mar SP, Brasil. *Ambiente & água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. [internet] 2016 Jun-Sep [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 11: 1190-1206. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar>
12. Terra SNCM, Mello MJ, Mello RC, Santos MR, Nunes RCA, Raimundo RM. influência topo-edafo-climática na vegetação de um fragmento de mata atlântica na serra da Mantiqueira. *ambiente & água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [internet] 2015 Jul-Out [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 10(4): 929-942. disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1705>
13. Bizuti TGD, SOARES MT, Duarte MM, Casagrande CJ, Moreno SV, Peinado JMF, et al. Recuperação de fósforo no solo de antigas minas de bauxita através da restauração de florestas tropicais. *Restoration Ecology*. 2020; 28(5): 1237-1226.
14. Seganfredo Am, Bissani AC, Sá SE. fósforo interpretado como disponível às plantas e sua relação com as formas determinadas para fins ambientais em áreas de uso de dejetos animais. *Anais 5 reuniões Sul-Brasileira de Ciência dos Solos*; 15-17out de 2014 Rio Grande do Sul. Pelotas; 2014. p. 1-3.
15. Oliveira RCP. Precipitação do fosfato dicálcico: caracterização experimental e modelização. [Dissertação]. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2007.190 f.
16. Oliveira MPJ, Ernani RP, Gatiboni C, Pegoraro A. Alterações químicas e avaliação de p disponível na região adjacente aos grânulos de superfosfato triplo e diamônio fosfato em solos ácidos. *sociedade brasileira de ciência do solo* [internet] 2014 Out [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 38(5): 1526-1536 disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832014000500018>
17. Xu W, Ci X, Song C, He T, Zhang W, Li Q. Li. soil phosphorus heterogeneity promotes tree species diversity and phylogenetic clustering in a tropical seasonal rainforest. *ecology and evolution*. 2016 Nov; 6: 8719-8726, 2016. <https://doi.org/10.1002/ece3.2529>
18. Camêlo LD, Ker CJ, Novais FR, Corêa MM, Lima CV. Sequential Extraction of Phosphorus by Mehlich-1 and Ion Exchange Resin from B Horizons of Ferric and Perferric Latosols (Oxisols). *Embrapa* [internet] 2015 Jul-Aug [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 39(4). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140405>
19. Mabagala SF, Mng'ong'o EM. On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*. [internet] 2022 mai [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 29: 3635-3641. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056>
20. Teixeira PC, Domagemma GK, Fontana A, Teixeira WG. Manual de métodos de análise de solo. ed.3. Brasília, Distrito Federal; 2017.
21. Guareschi FR, Pereira GM, Perin A. Deposição de Resíduos Vegetais, Matéria Orgânica Leve, Estoques de Carbono e Nitrogênio e Fósforo Remanescente Sob Diferentes Sistemas de Manejo no Cerrado Goiano. *Embrapa* [internet] 2012 Jun [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 36(3). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300021>
22. Aduan RE, Vilela MDF, Klink CA. Ciclagem de Carbono em Ecossistemas Terrestres - O Caso do Cerrado Brasileiro. ed.1. Brasília: Distrito Federal; 2003. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/569012>
23. Schlesinger, WH, Bernhardt E. S. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, Elsevier. ed. 4, 1997.
24. Quezada PFJ, Pérez AC, Brito EC, Fuentes PJ, Gaxiola A, Riquelme AD, et al. *Forest Ecology and Managem.* [internet] 2021 Agos [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 494. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119341>

25. Christensen BT. Organic matter in soil: structure, function and turnover. [tese] Instituto Dinamarquês de Ciências Agrárias, Centro de Pesquisa Foulum; 2000 95 f.
26. Stau DCP, Scupino MRC. Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás. 1 ed. Brasília, 2016.
27. Alvares AC, Stape LJ, Sentelhas CP, Gonçalves MLJ, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift. [internet] 2013 Jan [citado em 05 de fevereiro de 2013]; 22(6): 711-728. Disponível em: http://143.107.18.37/material/mftandra2/ACA0225/Alvares_etal_Koppen_climate_classBrazil_MeteoZei_2014.pdf
28. Schaefer EC, Campos FCJ, Corrêa RG. Carajás: aspectos naturais e socioeconômicos no entorno das áreas protegidas. ICMBio, Belo Horizonte; 2019.
29. Lindenmayer GL, Ronchi HL, Laux HJ. Geologia e geoquímica da mineralização de Cu-Au primária da Mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás. ResearchGate [internet] 1998 set [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 28(3): 257-68. Disponível em: <https://papegeo.igc.usp.br/portal/wp-content/uploads/tainacan-items/15906/41641/11221-13678-1-SM.pdf>
30. R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; 2024.
31. Essington ME. Química do solo e da água: uma abordagem integrativa. Boca Raton; 2003.
32. Sparks DL. Química Ambiental do Solo. San Diego; 2003.
33. Sposito GA. Química dos solos. Nova York: Oxford. Jornal universitário; 2008.
34. Iba TO, Udo EF. Phosphorus forms and fixation capacity of representative soils in Akwa Ibom State of Nigeria. Geoderma. [internet] 1993 Agos [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 58: 95-106. disponível em: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90087-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90087-2)
36. Soong LJ, Janssens AI, Grau O, Margalef O, Stahl C, Leandrovan VL, et al. Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests. Scientific reports. [internet] 2020 Fev [citado em 05 de fevereiro de 2025]; 10(2320): 1-13. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58913-8>
37. Giweta M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. Journal of Ecology and Environmental, 2020; (44)11: 1-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s41610-020-0151-2>
38. SANDE VTM, ARETS MMJE, CLAROS PM; HOOSBEEK RM, SIANI CY, HOUT VP, et al. Soil fertility and species traits, but not diversity, drive productivity and biomass stocks in a Guyanese tropical rainforest. Functional Ecology. 2017 mai; 44(11): 1-9. doi:10.1186/s41610-020-0151-2
39. Li J, Li X, Wang F, Zou B, Chen Y, Zhao J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community in a secondary tropical forest of china. Biol fertil soils. 2015 Out; 51: 207-215. doi:10.1007/s00374-014-0964-1
40. Jobbágy E, Jackson BR. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. Biogeochemistry. 2001 Mar; 53:51-77. doi:10.1023/A:1010760720215.
41. Vilar CC, Costa SCA, Hoepers A, Junior SGI. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. Revista brasileira de ciência do solo. [internet] 2010 ago [citado no dia 05 de fevereiro de 2025]; 34: 1059-1068. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/R3YbsScFq8KbrqTbNv8mm8r/?lang=pt>
42. Omenda JA, Ngetich KF, Kiboi MN, Muna MWM, Mugendi DN. Phosphorus availability and exchangeable aluminum response to phosphate rock and organic inputs in the Central Highlands of Kenya. Celspress. 2021 mar; 7: 1-8. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06371
43. Delfim JJ, Salvador OJ, Moraes CAL, Moreira A. Effect of liming and phosphorus source on soil fertility, growth, and nutritional status of guava seedlings in three tropical soils. Journal of Plant Nutrition, 2021 dez; 48(1): 1403-1412. doi:10.1080/01904167.2021.2020836

Biodiversidade Brasileira

Fluxo Contínuo

v. 15 n. 4, 2025

<https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/>

Biodiversidade Brasileira é uma publicação eletrônica científica do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) que tem como objetivo fomentar a discussão e a difusão de experiências em conservação e manejo de unidades de conservação, gestão e uso sustentável de recursos naturais renováveis, biodiversidade e espécies ameaçadas, fiscalização e proteção da biodiversidade e patrimônio natural, e educação e formação para a conservação da sociobiodiversidade.

ISSN: 2236-2886

