PADRÕES NA RELAÇÃO ENTRE A DIVERSIDADE DA VEGETAÇÃO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NO AMAZONAS

Cleyriane Miranda da Silva, Benedita Rafaela de Freitas de Almeida, Luciano Marques Pinheiro Dias, Ricardo Souza Nunes, Caroline Junqueira Sartori, Bruno Oliveira Lafetá

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais / Departamento de Engenharia Florestal, Avenida Primeiro de Junho, 1043, Centro - 39705-000 - São João Evangelista-MG, Brasil, cleyriane.educa@gmail.com, eng.ftalbralmeida@gmail.com, lucianompd7@gmail.com, ricardosouza20040@gmail.com, caroline.junqueira@ifmg.edu.br, bruno.lafeta@ifmg.edu.br

Resumo
Este estudo teve como objetivo avaliar a relação entre a diversidade arbórea e atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, Brasil. Foram analisados 108 conglomerados do Inventário Florestal Nacional, sendo avaliados a diversidade de Shannon–Wiener (H′), Ca, Mg, K, P e pH-H_2O. As distribuições foram caracterizadas por estatística descritiva e teste de Shapiro–Wilk, e as associações entre H′ e os atributos químicos foram avaliadas pelos coeficientes de Pearson e Spearman. Todas as variáveis apresentaram distribuição não normal, com elevada variabilidade para Ca e Mg. Pearson indicou associações negativas e significativas entre H′ e Ca e Mg, não confirmadas por Spearman. Para K, Spearman indicou associação positiva e de baixa magnitude, enquanto Pearson não apresentou significância. De modo geral, os atributos químicos avaliados não apresentaram associação consistente com a diversidade arbórea. Conclui-se que a relação entre diversidade arbórea e atributos químicos do solo depende da forma de associação considerada, sendo importante avaliar a estrutura dos dados para sua adequada interpretação.
Palavras-chave: Correlação de Pearson. Correlação de Spearman. Fertilidade do solo. Floresta natural. Índice de Shannon–Wiener.

Área do Conhecimento: Engenharia Agronômica, Engenharia Florestal.

Introdução

A diversidade arbórea está diretamente relacionada à organização das comunidades florestais e constitui um componente fundamental da estrutura ecológica das florestas amazônicas. Sua distribuição resulta da interação entre fatores bióticos e abióticos, entre os quais as condições edáficas exercem influência sobre o estabelecimento e a distribuição das espécies. Propriedades químicas do solo, como acidez e disponibilidade de nutrientes, estão associadas à disponibilidade de recursos para as plantas e podem atuar como filtros ambientais sobre a composição das comunidades. Na Amazônia, a diversidade arbórea ocorre sob ampla variação das condições edáficas, o que estabelece diferentes contextos ambientais para a manutenção das comunidades florestais (LAURANCE *et al*., 2010; TER STEEGE *et al*., 2023).

A relação entre diversidade arbórea e condições edáficas não apresenta necessariamente o mesmo padrão entre diferentes ambientes e escalas espaciais. Estudos realizados na Amazônia demonstram que características do solo, associadas a outros componentes ambientais, estão relacionadas à distribuição da riqueza e da diversidade arbórea (LAURANCE *et al*., 2010; TER STEEGE *et al*., 2023). Entretanto, a compreensão dessas relações depende da forma como a diversidade é quantificada e de como os atributos ambientais são avaliados. Estudos anteriores na Amazônia frequentemente empregaram correlações lineares ou modelos lineares generalizados, sem considerar a influência da distribuição dos dados sobre os coeficientes de associação. A relação entre a diversidade arbórea e atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas ainda é pouco explorada, sobretudo sob uma abordagem que considere as características estatísticas dos dados e diferentes formas de associação entre as variáveis.

A avaliação dessa relação sob diferentes perspectivas estatísticas permite ampliar a caracterização dos padrões de associação entre diversidade arbórea e condições edáficas, contribuindo para uma interpretação mais consistente das relações observadas em florestas naturais amazônicas. Mediante o exposto, este estudo teve como objetivo avaliar a relação entre a diversidade arbórea e atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, por meio da caracterização das distribuições dos dados e da comparação entre correlações lineares e monotônicas.

Metodologia

A base de dados utilizada neste estudo foi obtida do Inventário Florestal Nacional (IFN), coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB). Foram selecionados exclusivamente conglomerados amostrais inseridos em remanescentes de florestas naturais do bioma Amazônia no estado do Amazonas, sendo excluídas unidades localizadas em áreas de florestas plantadas.

A amostragem contemplou 108 conglomerados distribuídos sistematicamente em uma malha de 20 × 20 km. Cada conglomerado foi constituído por quatro subparcelas retangulares de área fixa (20 × 100 m; 0,2 ha), dispostas segundo a configuração denominada “cruz de Malta”, com os centros das subparcelas posicionados a 50 m do ponto central do conglomerado e orientados segundo os pontos cardeais.

A caracterização da composição florística considerou todos os fustes com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 10,0 cm, identificados em nível de espécie, conforme os procedimentos estabelecidos pelo protocolo do SFB. No conjunto amostrado, foram registrados 26.929 fustes, com média de 107 espécies por conglomerado. A diversidade da vegetação em cada conglomerado foi estimada pelo índice de diversidade de Shannon-Wiener (H′), calculado a partir da proporção de indivíduos pertencentes a cada espécie, conforme:

$$H' = \sum_{i=1}^{S} p_i \ln\left(p_i\right)$$

Em que *H′* é o índice de diversidade de Shannon–Wiener, *S* é o número de espécies no conglomerado e p_i corresponde à proporção de indivíduos da espécie i em relação ao número total de indivíduos amostrados no conglomerado.

As informações químicas do solo foram obtidas conforme os protocolos de amostragem e análises laboratoriais adotados pelo IFN. As amostras foram coletadas na camada de 0–20 cm de profundidade, em um raio de até 2 m do ponto central de cada conglomerado, utilizando trado holandês ou cavadeira. Foram considerados nas análises o pH determinado em água (pH-H_2O) e os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo assimilável (P). O Ca e o Mg foram expressos em cmolc kg^{-1}, o K em cmolc kg^{-1} e o P em mg kg^{-1}.

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo determinados os valores mínimo, máximo, média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação e quartis. A assimetria das distribuições foi avaliada pela diferença entre média e mediana. A normalidade das variáveis foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se nível de significância de 5%.

Para avaliar a associação entre a diversidade da vegetação e os atributos químicos do solo, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson (r) e de Spearman (ρ). O coeficiente de Pearson foi utilizado para avaliar a intensidade e a direção das associações lineares, enquanto o coeficiente de Spearman foi empregado para verificar relações monotônicas com base na ordenação dos valores. A utilização conjunta dos dois coeficientes tem propósito comparativo da influência da estrutura das distribuições sobre a interpretação das associações entre a diversidade vegetal e as características químicas do solo.

As relações entre a diversidade de Shannon-Wiener e cada atributo químico também foram representadas graficamente por diagramas de dispersão, complementados por curvas de tendência obtidas por regressão local ponderada (LOESS), com finalidade exclusivamente descritiva.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foi adotado o nível de significância de 5,0% em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.6.0 (R CORE TEAM, 2026).

Resultados

Foram analisadas 108 observações de diversidade arbórea e atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas. A diversidade apresentou baixa variabilidade relativa (CV = 11,29%), semelhante à observada para o pH-H_2O (CV = 9,31%). Em contraste, os atributos químicos apresentaram maior dispersão, especialmente Ca (CV = 612,22%) e Mg (CV = 357,63%), seguidos por P (CV = 73,65%) e K (CV = 58,61%). A elevada variabilidade relativa de Ca e Mg também foi acompanhada por médias substancialmente superiores às respectivas medianas, evidenciando forte assimetria positiva nas distribuições (Tabela 1).

Tabela 1 - Estatística descritiva e teste de normalidade das variáveis de diversidade da vegetação e atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, Brasil.

Variável	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Mediana	Máximo	W	p
H′	4,1741	0,4713	2,1746	4,1718	4,9486	0,9394	<0,0001
pH-H_2O	3,9356	0,3665	3,2100	3,9200	5,1800	0,9688	0,0121
Ca	0,2731	1,6716	0,0000	0,0100	12,8400	0,1456	<0,0001
Mg	0,2617	0,9363	0,0100	0,1000	8,0900	0,1986	<0,0001
K	0,0762	0,0447	0,0181	0,0691	0,2498	0,8624	<0,0001
P	3,3130	2,4403	0,7825	2,6687	19,0058	0,7537	<0,0001

W = estatística do teste de normalidade de Shapiro–Wilk; p < 0,05 indica rejeição da hipótese de normalidade.
Fonte: os autores.

O teste de Shapiro–Wilk indicou ausência de normalidade (p ≤ 0,05) para todas as variáveis avaliadas (Tabela 1). Entre os atributos químicos, Ca e Mg apresentaram os menores valores da estatística W, indicando maior afastamento da distribuição normal, em concordância com a assimetria positiva observada para esses elementos. O pH-H_2O apresentou o maior valor de W entre as variáveis analisadas, caracterizando a distribuição mais próxima da normalidade, embora a hipótese de normalidade também tenha sido rejeitada ao nível de confiança de 5%.

As correlações entre a diversidade da vegetação e os atributos químicos do solo diferiram entre os métodos de Pearson e Spearman (Tabela 2). Pelo coeficiente de Pearson, Ca e Mg apresentaram associações lineares negativas e significativas com H′ (p ≤ 0,05), enquanto pH-H_2O, K e P não apresentaram correlações significativas (p > 0,05). Em contraste, o coeficiente de Spearman não indicou associação significativa entre H′ e pH-H_2O, Ca, Mg ou P. Para K, observou-se correlação monotônica positiva e significativa, embora de baixa magnitude. As demais variáveis não apresentaram associações significativas pelo método de Spearman.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação de Pearson e Spearman entre a diversidade da vegetação e os atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, Brasil.

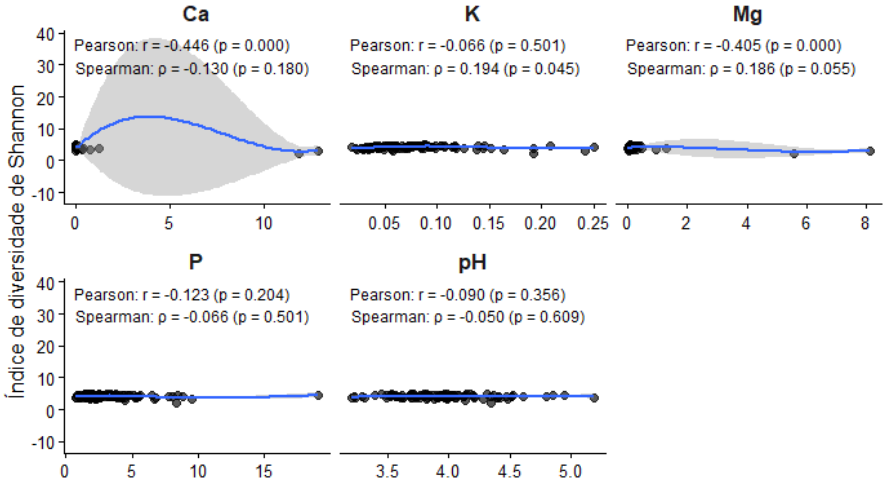
Atributo	Pearson (r)	P	Spearman (ρ)	p
pH-H_2O	−0,0896	0,3564	−0,0498	0,6086
Ca	−0,4455	<0,0001	−0,1300	0,1801
Mg	−0,4045	<0,0001	0,1855	0,0546
K	−0,0655	0,5006	0,1937	0,0446
P	−0,1232	0,2041	−0,0655	0,5005

r = coeficiente de correlação de Pearson; ρ = coeficiente de correlação de Spearman; valores em negrito indicam correlações significativas (p < 0,05).
Fonte: os autores.

A comparação entre os coeficientes demonstrou diferenças particularmente marcantes para Mg e K, cujas correlações apresentaram mudança de sinal entre os métodos. Para Ca, embora a direção da associação tenha sido mantida, sua magnitude foi substancialmente reduzida quando considerada a correlação por postos. Essas diferenças evidenciam que a escolha do método de correlação pode modificar a magnitude e até a direção das associações observadas entre a diversidade da vegetação e os atributos químicos do solo.

As relações entre H′ e os atributos químicos do solo são apresentadas graficamente na Figura 1. Os diagramas de dispersão revelaram diferentes padrões de associação entre a diversidade e os atributos avaliados. Para Ca, observou-se maior dispersão dos dados e uma faixa de confiança mais ampla em comparação aos demais atributos, acompanhando a elevada variabilidade apresentada por esse elemento. Mg também apresentou considerável dispersão, embora com faixa de confiança menos ampla. Para pH-H_2O, K e P, as curvas de tendência apresentaram comportamento discreto, sem padrão visual marcante de associação com H′. De modo geral, a representação gráfica mostrou diferentes padrões de associação entre H′ e os atributos químicos do solo.

Figura 1 - Relação entre a diversidade da vegetação (H′) e os atributos químicos do solo em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, Brasil.



A linha representa a tendência ajustada por regressão local ponderada (LOESS), e a faixa sombreada corresponde ao intervalo de confiança de 95%.
Fonte: os autores.

Discussão

A distribuição dos atributos químicos do solo apresentou elevada heterogeneidade entre os remanescentes florestais avaliados, sobretudo para Ca e Mg (Tabela 1), que exibiram os maiores coeficientes de variação e forte assimetria positiva. Esse comportamento indica que a disponibilidade desses elementos não ocorre de maneira espacialmente uniforme no estado do Amazonas, refletindo a diversidade das condições edáficas sob as quais as florestas naturais se desenvolvem. Em escala de paisagem, diferenças de textura, disponibilidade hídrica, pH, fósforo e bases trocáveis já foram associadas à variação da diversidade arbórea na Amazônia central, demonstrando que a heterogeneidade do solo constitui componente importante da estruturação das comunidades vegetais (LAURANCE *et al*., 2010).

A contrastante variabilidade entre H′ e os atributos químicos também merece destaque. Enquanto H′ apresentou baixa variabilidade relativa, Ca, Mg, K e P foram consideravelmente mais heterogêneos. Esse resultado sugere que a diversidade arbórea não acompanha necessariamente, de forma direta, a variação de um único atributo químico. A flora amazônica está distribuída sobre uma grande variedade de combinações entre tipos florestais, condições edáficas e características ambientais, e estudos em ampla escala mostram que associações entre solo e diversidade podem ocorrer de maneira espacialmente estruturada, com diferentes combinações de ambiente influenciando a riqueza e a diversidade local (TER STEEGE *et al*., 2023).

A rejeição da hipótese de normalidade para todas as variáveis, particularmente diante da forte assimetria de Ca e Mg, contextualiza as diferenças observadas entre os coeficientes de Pearson e Spearman (Tabela 2). As correlações lineares negativas obtidas para Ca e Mg não foram confirmadas pela análise por postos, o que indica que a associação observada por Pearson não correspondeu a um gradiente monotônico consistente ao longo dos dados. Em outras palavras, embora os valores dessas variáveis apresentassem tendência linear negativa quando considerados na escala original, a ordenação conjunta das observações não sustentou uma relação monotônica equivalente. Esse

resultado é importante porque evita que a significância estatística de uma correlação linear seja interpretada, isoladamente, como evidência de uma relação ecológica consistente.

A diferença entre os coeficientes de correlação foi expressiva para Mg e K, com mudança na direção das associações no caso de Mg. Para Mg, a correlação por Pearson foi negativa e significativa, enquanto Spearman apresentou associação positiva, porém não significativa. Para K, houve diferença quanto à significância das associações: a associação linear não foi significativa, mas a correlação por postos foi positiva e significativa, embora de baixa magnitude. Esse comportamento reforça a importância de avaliar simultaneamente a forma dos dados e o padrão de associação antes de atribuir significado ecológico às correlações. No caso de K, o resultado sugere apenas uma tendência monotônica discreta entre maior disponibilidade do elemento e maiores valores de H′, não sendo suficiente para caracterizar o potássio como determinante isolado da diversidade.

A ausência de associação significativa entre H′ e P também não deve ser interpretada como ausência de influência ecológica do fósforo sobre a vegetação amazônica. Em estudo realizado na Amazônia central, Laurance *et al*. (2010) verificaram que gradientes relacionados à disponibilidade de água e fósforo estiveram entre os principais preditores da diversidade arbórea, sendo as áreas menos limitadas por esses recursos aquelas que apresentaram maior riqueza de espécies. A diferença entre esse padrão e o encontrado no presente estudo pode estar relacionada à escala espacial, ao conjunto de variáveis analisadas e, sobretudo, ao fato de H′ incorporar simultaneamente riqueza e distribuição das abundâncias, enquanto diferentes métricas de diversidade podem responder de maneira distinta aos gradientes ambientais.

O resultado obtido para K merece atenção por representar a única associação significativa identificada pelo coeficiente de Spearman. Apesar de positiva, a magnitude da correlação foi baixa ($\rho = 0{,}1937$), indicando que o aumento de K esteve associado apenas modestamente aos valores de H′. A importância potencial dos nutrientes básicos para a vegetação amazônica encontra respaldo em estudos que demonstram mudanças na composição e nas características funcionais das comunidades ao longo de gradientes de fertilidade do solo. Fyllas *et al*. (2017), por exemplo, encontraram forte influência das condições ambientais sobre características químicas foliares das árvores amazônicas, incluindo respostas associadas à fertilidade edáfica. Assim, a associação detectada para K pode representar parte de um gradiente edáfico mais amplo, e não necessariamente um efeito independente desse nutriente sobre a diversidade.

Os diagramas de dispersão complementam essa interpretação ao mostrar ampla dispersão dos valores, principalmente para Ca e Mg, e ausência de padrões visuais acentuados para pH-H_2O, K e P (Figura 1). A maior largura das faixas de confiança associadas a Ca e Mg está de acordo com a elevada variabilidade dessas variáveis e com a presença de valores extremos. Por outro lado, as curvas LOESS não indicaram mudanças acentuadas e consistentes na diversidade ao longo dos gradientes químicos, reforçando que as relações observadas são relativamente fracas quando analisadas individualmente. Dessa forma, a representação gráfica contribuiu para evitar interpretações baseadas exclusivamente em valores de probabilidade e coeficientes de correlação.

De modo geral, os resultados indicam que a diversidade arbórea dos remanescentes analisados não apresentou associação linear ou monotônica consistente com a maior parte dos atributos químicos avaliados. A exceção foi a relação positiva e de baixa magnitude entre H′ e K identificada por Spearman. Esse conjunto de resultados demonstra que a relação entre diversidade vegetal e condições edáficas na Amazônia é complexa e dificilmente pode ser explicada por atributos químicos isolados. A heterogeneidade ambiental em diferentes escalas, combinada à interação entre propriedades do solo, disponibilidade hídrica, topografia e composição florística, deve ser considerada na interpretação dos padrões observados (LAURANCE *et al*., 2010; TER STEEGE *et al*., 2023).

Conclusão

Nos remanescentes de floresta natural estudados no estado do Amazonas, a diversidade arbórea não se associa de forma consistente aos atributos químicos do solo avaliados. A comparação entre os coeficientes de Pearson e Spearman evidencia diferenças na interpretação dessas associações, especialmente para Ca, Mg e K, reforçando a importância de considerar a distribuição dos dados na avaliação das relações entre diversidade arbórea e atributos edáficos.

Referências

FYLLAS, N. M.; BENTLEY, L. P.; SHENKIN, A.; ASNER, G. P.; ATKIN, O. K.; DÍAZ, S.; ENQUIST, B. J.; FARFAN-RIOS, W.; GLOOR, E.; GUERRIERI, R.; HUASCO, W. H.; ISHIDA, Y.; MARTIN, R. E.; MEIR, P.; PHILLIPS, O.; SALINAS, N.; SILMAN, M.; WEERASINGHE, L. K.; ZARAGOZA-CASTELLS, J.; MALHI, Y. Solar radiation and functional traits explain the decline of forest primary productivity along a tropical elevation gradient. **Ecology Letters**, v. 20, n. 6, p. 730-740, 2017.

LAURANCE, S. G. W.; LAURANCE, W. F.; ANDRADE, A.; FEARNSIDE, P. M.; HARMS, K. E.; VICENTINI, A.; LUIZÃO, R. C. 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, 2010.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2026.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N. C. A.; DO AMARAL, I. L.; COELHO, L. S.; MATOS, F. D. A.; LIMA FILHO, D. A.; SALOMÃO, R. P.; WITTMANN, F.; CASTILHO, C. V.; GUEVARA, J. E.; CARIM, M. J. V.; PHILLIPS, O. L.; MAGNUSSON, W. E.; SABATIER, D.; REVILLA, J. D. C.; MOLINO, J.-F.; IRUME, M. V.; MARTINS, M. P.; GUIMARÃES, J. R. S.; RAMOS, J. F.; BÁNKI, O.; PIEDADE, M. T. F.; CÁRDENAS LÓPEZ, D.; RODRIGUES, D. J.; DEMARCHI, L. O.; SCHÖNGART, J.; ALMEIDA, E. J.; BARBOSA, L. F.; CAVALHEIRO, L. R.; SANTOS, M. C. V.; LUIZE, B. G.; DE LEÃO NOVO, E. M.; VARGAS, P. N.; SILVA, T. S. F.; VENTICINQUE, E. M.; MANZATTO, A. G.; REIS, N. F. C.; TERBORGH, J.; CASULA, K. R.; HONORIO CORONADO, E. N.; MONTEAGUDO MENDOZA, A.; et al. Mapping density, diversity and species-richness of the Amazon tree flora. **Communications Biology**, v. 6, art. 1130, 2023.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) e ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB), pelo fornecimento de informações e recursos que contribuíram para a realização deste trabalho.