



Gradientes de altura do dossel entre as regiões fitoecológicas da Amazônia

Canopy height gradients among the phytophysiognomic regions of the Amazon

Gustavo Henrique de Oliveira Mourão¹; Artur Ferro de Souza²; Maria Luiza de Azevedo³; Bruno Henrique Ribeiro Pereira⁴; Josiane Silva Costa Bruzina⁵; Eric Bastos Gorgens⁶

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
gustavo.mourao@ufvjm.edu.br

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
artur.ferro@ufvjm.edu.br

³Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br

⁴Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
bruno.pereira@ufvjm.edu.br

⁵Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
josiane.bruzinga@ufvjm.edu.br

⁶Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
eric.gorgens@ufvjm.edu.br

Resumo: A Amazônia brasileira apresenta elevada diversidade estrutural, cuja compreensão é essencial para o manejo sustentável e a conservação. Este estudo investigou como as alturas médias e máximas do dossel variam entre as regiões fitoecológicas do IBGE. Foram utilizados 805 transectos LiDAR do projeto EBA, processados para gerar modelos digitais de altura do dossel. As métricas de altura média e máxima foram extrapoladas para toda a Amazônia por meio de algoritmos Random Forest, com 16 variáveis ambientais como preditoras. Os resultados evidenciaram gradientes estruturais claros, com dosséis mais altos em florestas ombrófilas e valores reduzidos em formações savânicas, além de heterogeneidade interna relevante, expressa pela diferença entre alturas médias e máximas. Essas métricas mostram potencial para complementar a classificação fitoecológica tradicional, aprimorando a definição de limites e contribuindo para o monitoramento e planejamento florestal.

Palavras-chaves: Estrutura florestal; Heterogeneidade vertical; Mapeamento ecológico.

Abstract: The Brazilian Amazon exhibits high structural diversity, which is essential to understand for sustainable management and conservation. This study investigated how mean and maximum canopy heights vary among the IBGE phytophysiognomic regions. We used 805 airborne LiDAR transects from the EBA project, processed to generate digital canopy height models. Mean and maximum height metrics were extrapolated across the Amazon using Random Forest algorithms with 16 environmental variables as predictors. The results revealed clear structural gradients, with taller canopies in ombrophilous forests and lower values in savanna formations, as well as significant internal heterogeneity expressed by the difference between mean and maximum heights. These metrics show potential to complement traditional phytophysiognomic classification, improving boundary definition and contributing to forest monitoring and planning.

Keywords: Forest structure; Vertical heterogeneity; Ecological mapping.



INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior floresta tropical contínua do planeta, concentrando cerca de 15 % da biodiversidade terrestre (Nobre, 2016). Apesar de sua importância ecológica e climática, a floresta enfrenta pressões intensas de desmatamento, degradação e mudanças climáticas, fatores que podem comprometer sua capacidade de manter serviços ecossistêmicos críticos. Para organizar o conhecimento sobre a vegetação nacional, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) elaborou o Mapa de Vegetação do Brasil, cujo sistema fisionômico- ambiental delimita regiões fitoecológicas ao combinar critérios de formação, fisionomia e ambiente (IBGE, 2012). Na Amazônia, tais regiões englobam formações que variam de Savana-Estépica a Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2012). Contudo, essas categorias podem ocultar forte heterogeneidade estrutural interna, principalmente no que se refere a altura do dossel.

A estrutura vertical, em especial a altura do dossel, influencia o microclima florestal e a produtividade primária, além de responder a gradientes de solo, clima e distúrbios ambientais (Liu et. al, 2025). Apesar disso, métricas quantitativas de altura ainda não foram integradas à legenda fitoecológica oficial do IBGE, limitando a capacidade de diagnóstico estrutural em escala continental. Integrar métricas de altura às tipologias existentes pode refinar o diagnóstico estrutural das fitofisionomias amazônicas e orientar estratégias de monitoramento e manejo florestal. O objetivo deste estudo foi investigar como as alturas médias e máximas dos dosséis variam entre as regiões fitoecológicas da Amazônia brasileira.

MATERIAL E MÉTODOS

Para quantificar a variação estrutural da vegetação amazônica, utilizou-se 805 transectos com dados LiDAR aerotransportados, provenientes do projeto Estimativa de Biomassa da Amazônia (EBA), conduzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esses transectos estão distribuídos majoritariamente de forma aleatória ao longo de toda a região amazônica brasileira. Cada transecto foi processado para gerar modelos digitais de altura do dossel (MDAD) a partir da normalização das alturas em relação ao terreno e da remoção de ruídos. A partir dos MDADs extraímos duas métricas principais. A altura máxima do dossel corresponde ao valor de dossel mais elevado registrado em cada transecto. A altura média do dossel foi calculada como a média dos valores de altura



superiores a cinco metros em cada transecto, o que assegura a exclusão de vegetação herbácea, vegetação rasteira e informações do solo. A média da altura do dossel foi então resumida em centroides correspondentes a cada transecto.

Ambas as métricas foram modeladas para o bioma Amazônia por meio de algoritmo *Random Forest*, adaptando a abordagem originalmente aplicada à altura máxima desenvolvida por Gorgens et al. (2020). Para detalhes sobre a resolução temporal e espacial, bem como as fontes originais dessas camadas, veja o artigo de Gorgens et al. (2020). Os valores observados de altura máxima e média nos transectos serviram como resposta para treinamento e posterior predição espacial, resultando em dois mapas contínuos para toda a Amazônia brasileira: um de altura máxima e outro de altura média do dossel, com resolução espacial de 500 metros.

Para investigar como essas alturas variam entre as distintas regiões fitoecológicas amazônicas, empregamos o Mapa de Vegetação do Brasil do IBGE (2012). Os polígonos foram dissolvidos de acordo com as regiões fitoecológicas definidas nesta camada. Áreas classificadas como corpos d'água continentais foram excluídas por não representarem vegetação arbórea. Os dois mapas de altura (altura máxima e altura média do dossel) foram então intersectados com as regiões fitoecológicas do IBGE, extraíndo assim os valores dentro de cada região. Para cada fitoecologia obtivemos a distribuição completa dos valores de altura máxima e média do dossel. Essas distribuições foram resumidas pelas medianas.

Para comparar visualmente as distribuições de altura média e máxima do dossel entre as regiões fitoecológicas, foram preparados gráficos violino divididos (*split violin*). Para cada classe, a metade esquerda do violino representa a distribuição dos valores de altura média do dossel e a metade direita representa a distribuição dos valores de altura máxima do dossel. As escalas originais em metros são exibidas por eixos paralelos (esquerdo para altura média; direito para altura máxima) de modo a manter a unidade biológica das duas métricas. Toda a preparação de dados, modelagem e visualização foi realizada em ambiente estatístico R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo *Random Forest* aplicado aos 805 transectos LiDAR gerou mapas de altura média (9,5 - 30,4 metros) e altura máxima (27,7 - 81,5 metros) em resolução de 500 m para toda a Amazônia brasileira (Figura 1). A distribuição espacial exhibe dosséis mais altos no



centro, oeste e noroeste, decrescendo gradualmente em direção às transições com o bioma cerrado (sul, sudeste e leste) e no noroeste amazônico. Esses gradientes são coerentes com os padrões já apontados em outros estudos, que associaram variações regionais na altura do dossel a padrões edafoclimáticos, energéticos e de distúrbios ambientais (Gorgens et al., 2020; Liu et al. 2025; Wagner et al., 2025).

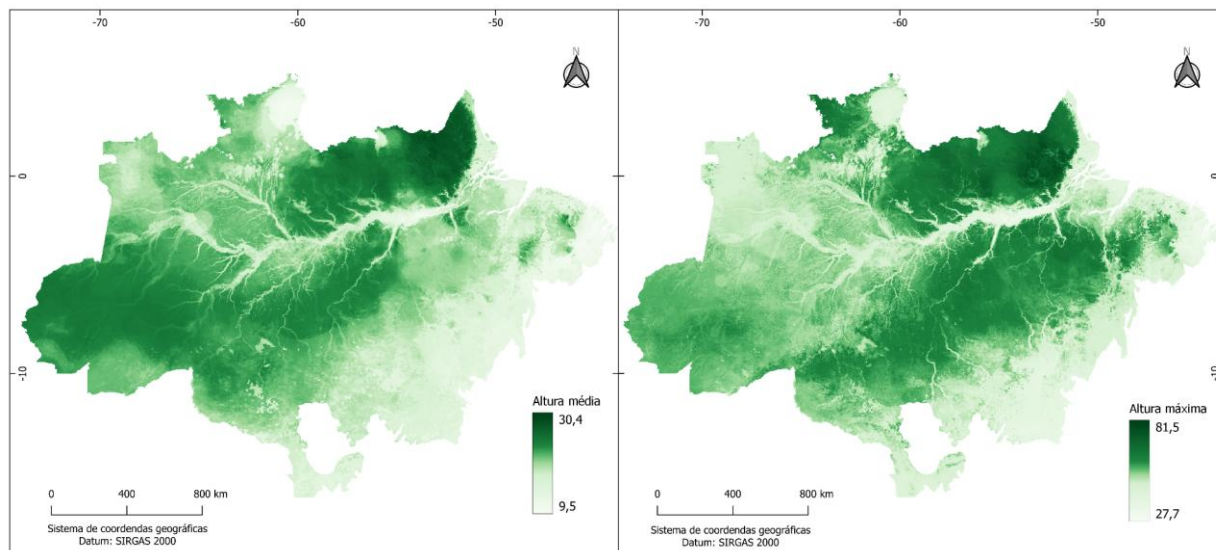


Figura 1: Mapas de altura média (painel esquerdo) e altura máxima (painel direito) do dossel florestal da Amazônia brasileira derivados de dados LiDAR extrapolados por Random Forest.

Ao condensar os pixels por regiões fitoecológicas do IBGE (Figura 2; Tabela 1) emerge um gradiente bem definido de altura média do dossel, onde as diferentes fitofisionomias amazônicas exibem assinaturas estruturais distintas de dossel: formações abertas (Savana- Estépica, Savana e Formações Pioneiras) apresentam medianas de 13,8 a 15,4 m; as Florestas Estacionais progridem de 16,4 m (Sempre- Verde) a 18,2 m (Decidual); Campinarana e Contato situam- se em torno de 19 m; e as Florestas Ombrófilas alcançam ~22 m. Esse padrão demonstra um gradiente crescente de altura média das formações mais abertas para as mais florestadas. Embora as diferenças absolutas entre as medianas das alturas médias dos dosséis pareçam modestas (aproximadamente 8 m de ponta a ponta), a tendência monotônica reforça que a legenda fitoecológica do IBGE captura um gradiente estrutural real no porte do dossel amazônico.

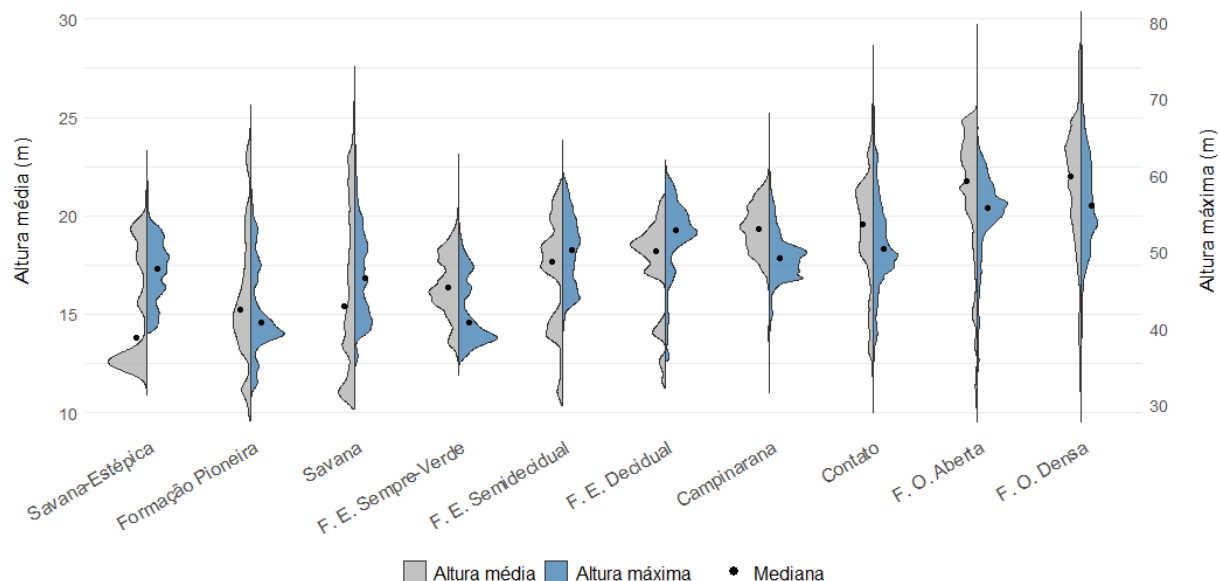


Figura 2: Distribuição das alturas do dossel por região fitoecológica do IBGE. Metade esquerda de cada violino: valores de altura média; metade direita: altura máxima.

Tabela 1 – Medianas de altura média, altura máxima e a diferença “máxima – média” (ΔH) por região fitoecológica.

Região Fitoecológica	Altura média	Altura máxima	ΔH
Savana-Estépica	13,8	47,9	34,1
Formação Pioneira	15,2	40,8	25,6
Savana	15,4	46,6	31,2
Floresta Estacional Sempre-Verde	16,4	40,8	24,4
Floresta Estacional Semidecidual	17,7	50,4	32,7
Floresta Estacional Decidual	18,2	52,8	34,6
Campinarana	19,4	49,2	29,8
Contato (Ecótono e Enclave)	19,6	50,4	30,8
Floresta Ombrófila Aberta	21,8	55,9	34,1
Floresta Ombrófila Densa	22,0	56,2	34,2

A altura máxima acrescenta outra dimensão. Enquanto as formações savânicas e as formações pioneiras não excedem 48 m, as Florestas Ombrófilas Densa e Aberta atingem 56 m e caudas superiores a 80 m. Convém analisar a diferença “máxima – média” (ΔH) como



proxy de estratificação vertical (Tabela 1). O estudo revela ΔH na faixa de 29 e 35 m para a maioria das classes, mas valores notavelmente baixos em Florestas Estacionárias Sempre-Verde (24,4 m) e Formação Pioneira (25,6 m) contrastam com esse padrão. Florestas Estacionárias Sempre-Verde e Formação Pioneira possuem dosséis relativamente homogêneos, ao passo que as Florestas Ombrófilas refletem mosaicos estruturais complexos, com indivíduos excepcionais acima de um dossel já elevado.

Entretanto, as distribuições mostram sobreposições extensas: várias classes savânicas e mesmo formações pioneiras exibem caudas de altura máxima alcançando valores típicos de florestas ombrófilas (maior que 60 m em pixels isolados). A ocorrência de árvores altas na paisagem amazônica é modulada por bolsões de recursos edafoclimáticos e energéticos, e regimes de distúrbios ambientais (Gorgens et. al, 2020). Os fatores edafoclimáticos incluem características do solo, temperatura, precipitação e evapotranspiração potencial; os energéticos referem-se à fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação; e os distúrbios envolvem eventos como secas, chuvas excessivas, rajadas de vento e descargas elétricas. Além disso, as maiores árvores em escalas regionais apresentam padrão espacial agregado, podendo assim representar apenas uma pequena fração do dossel (Mourão, 2021). Com isso, limites fisionômicos podem conter mosaicos estruturais em que a presença de árvores isoladas no estrato emergente não invalida a classe, mas sinaliza heterogeneidade ambiental interna.

A ordenação interna nas Florestas Estacionais (Sempre-Verde, Semidecidual e Decidual) sugere que a perda foliar temporária pode constituir uma estratégia vantajosa para otimizar ganho de altura em ambientes sazonais, possivelmente por reduzir custos de manutenção hídrica durante o período seco e redirecionar recursos para crescimento axial. Estudos que comparam florestas decíduais e sempre- verdes relatam indivíduos mais altos e maior biomassa nas formações de folha caduca, atribuindo o padrão a investimentos mais agressivos em crescimento quando a água é abundante. Fayolle et al. (2016) ao analisarem a alometria altura- diâmetro de 521 árvores presentes em florestas tropicais, os autores verificaram que, para um mesmo diâmetro, as árvores da floresta semidecídua eram consistentemente mais altas que as da floresta sempre- verde. Esse desvio alométrico, aliado a maior densidade de povoamento, levou a estoques superiores de biomassa por hectare nas áreas semidecíduas, reforçando a hipótese de que a deciduidade foliar favorece o crescimento vertical em contextos de variação hídrica sazonal.



A forte variabilidade interna da altura média e máxima do dossel, apresentando diferentes picos em uma mesma fitofisionomia, indica que essas métricas estruturais quantitativas poderiam complementar a legenda existente. Elas podem oferecer limiares ou subzonas objetivas onde a gestão ou o monitoramento precisem discriminar florestas mais baixas das mais altas, possibilitando o estudo de mosaicos sucessionais ou formações sujeitas a distúrbios recorrentes. Embora o gradiente de altura média confirme a hierarquia fitoecológica do IBGE, a sobreposição dos intervalos interquartis entre classes vizinhas e a ampla variabilidade interna revelada pelas abas largas dos violinos indicam que as atuais fronteiras cartográficas agrupam microssítios, estágios sucessionais e regimes de uso distintos. Desse modo, ainda que a lógica fisionômica ambiental permaneça válida em escala regional, persiste heterogeneidade estrutural relevante no interior de diversas unidades. Classes como a Savana-Estépica podem se beneficiar de um particionamento orientado por estrutura vertical: a amplitude de alturas observada sugere que essa categoria agrega desde porções com altura média de dossel relativamente baixo até manchas com valores altos comparáveis às florestas ombrófilas, o que enfraquece sua utilidade como unidade analítica única.

CONCLUSÃO

A combinação de alturas média e máxima do dossel oferecem potencial significativo para complementar a classificação fisionômica- ambiental do IBGE. Ao fornecer limiares objetivos para distinguir unidades com porte arbóreo semelhante, esses atributos podem refinar fronteiras cartográficas, apoiar estimativas mais consistentes de biomassa e orientar estratégias integradas de conservação, manejo e monitoramento em escala continental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e FAPEMIG. Em especial registra-se os apoios CNPq 403297/2016-8, 401053/2019-9, 306386-2022-4; Fundo Amazônia 14.2.0929.1; USAID AID-OAA-A-11-00012.

REFERÊNCIAS

FAYOLLE, A. et al. Taller trees, denser stands and greater biomass in semi-deciduous than in evergreen lowland central African forests. *Forest Ecology and Management*, v. 374, p. 42-50, 2016.



GORGENS, E. B. et al. Resource availability and disturbance shape maximum tree height across the Amazon. *Global Change Biology*, v. 27, n. 1, p. 177-189, 2020.

IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico; inventário das formações florestais e campestres; técnicas e manejo de coleções botânicas; *procedimentos para mapeamentos*. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. (Manuais técnicos em geociências, n. 1. ISBN 978- 85- 240- 4272- 0.

LIU, S. et. al. Environmental drivers of spatial variation in tropical forest canopy height: Insights from NASA's GEDI spaceborne LiDAR. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 122, n. 10,, 2025. DOI: 10.1073/pnas.2401755122.

MOURÃO, G. H. O. *et al.* Distribuição espacial de árvores emergentes na Amazônia a partir de dados oriundos de escaneamento laser aerotransportado. 2021. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2021.

NOBRE, C. A. et al. Land- use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 39, p. 10759- 10768, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1605516113

WAGNER, F. H. et al. High Resolution Tree Height Mapping of the Amazon Forest using Planet NICFI Images and LiDAR-Informed U-Net Model. *arXiv preprint*, 2025.