



Diferenciação estrutural de manchas florestais por métricas de dossel na Amazônia Central

Structural differentiation of forest patches by canopy metrics in the central Amazon

Artur Ferro de Souza¹; Josiane Silva Costa Bruzina²; Nívea Maria Mafra Rodrigues³; Luciano Emmert⁴; Maria Luiza de Azevedo⁵; Eric Bastos Gorgens⁶

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucurí (UFVJM), Diamantina/MG
artur.ferro@ufvjm.edu.br

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucurí (UFVJM), Diamantina/MG
josiane.bruzinga@ufvjm.edu.br

³Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucurí (UFVJM), Diamantina/MG
niveamafra11@gmail.com

⁴Instituto Max Planck de Biogeoquímica, (MPI-BGC) Mainz, Alemanha.
lucianoemmert@yahoo.com.br

⁵Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucurí (UFVJM), Diamantina/MG
marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br

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

Resumo: A Floresta Amazônica é composta por mosaicos de manchas de vegetação que se encontram em diferentes estágios sucessionais. Este estudo investigou como mosaicos florestais em diferentes estágios sucessionais se distinguem com base em métricas estruturais do dossel. Utilizando dados de sensoriamento remoto, agrupamento k-means e análise de componentes principais (PCA), sete grupos foram identificados ($R^2 = 0,81$; $p = 0,004$). A PCA revelou que altura e rugosidade do dossel foram determinantes na separação dos grupos. A métrica de cobertura, embora relevante, teve menor poder discriminatório. Os resultados mostram que as métricas de estrutura do dossel tem potencial de serem associados aos estágios sucessionais, oferecendo oportunidade para o monitoramento da dinâmica sucessional em florestas tropicais.

Palavras-chaves: Dinâmica florestal; LiDAR; Sensoriamento remoto.

Abstract: The Amazon Rainforest is composed of mosaics of vegetation patches at different successional stages. This study investigated how forest mosaics at different successional stages can be distinguished based on canopy structural metrics. Using remote sensing data, k-means clustering, and principal component analysis (PCA), seven groups were identified ($R^2 = 0.81$; $p = 0.004$). The PCA revealed that canopy height and roughness were key in the separation of the groups. The canopy cover metric, although relevant, had lower discriminative power. The results show that canopy structural metrics can potentially associated with successional stages, offering opportunities for monitoring successional dynamics in tropical forests.

Keywords: Forest dynamics; LiDAR; Remote Sensing



INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é composta por mosaicos de vegetação que se encontram em diferentes estágios sucessionais (Chambers et al., 2013). Distúrbios naturais recorrentes e a recuperação da vegetação desempenham um papel fundamental na formação desses mosaicos florestais (Chambers et al., 2013). Eventos climáticos como chuvas intensas, ventos, secas, descargas elétricas e cheias periódicas atuam como agentes de perturbação, promovendo heterogeneidade estrutural na paisagem (Botta, Foley 2002; Marra et al., 2014).

Ao ser impactada por distúrbios naturais, manchas da floresta transitam de um estado relativamente estável para uma fase dinâmica de sucessão ecológica, caracterizada pela colonização inicial por espécies pioneiras e, posteriormente, pelo estabelecimento de espécies tardias em estágios mais avançados (Mesquita et al., 2001; Mirabel et al., 2021). As variações na estrutura e na composição florística refletem o estágio de desenvolvimento e o grau de maturidade dessas manchas (Silva et al., 2016), possibilitando a distinção entre os estágios.

Entender esses mosaicos florestais por meio de métricas LiDAR é crucial para estimar balanço de carbono e detectar tendências temporais na dinâmica florestal com maior eficiência, dada a dimensão das florestas brasileiras. Apesar das florestas secundárias recuperarem rapidamente sua cobertura, a altura e a rugosidade do dossel se reconstituem de forma mais lenta (Peña-Claros, 2003). Tais métricas estruturais são indicativas do estágio sucessional e, por isso, este estudo objetiva investigar a capacidade de métricas LiDAR do dossel em distinguir manchas florestais na Amazônia Central.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está situada ao norte da cidade de Manaus, no sítio de pesquisa da torre ATTO (Amazon Tall Tower Observatory), um centro de pesquisa dedicado ao estudo da dinâmica da Floresta Amazônica e suas interações climáticas. Os dados foram obtidos em 2021 por meio de varredura a laser aerotransportada (*Airborne Laser Scanning* - ALS, no âmbito do projeto Paisagens Sustentáveis Brasil) sobre 2.400 hectares a leste do ATTO. Por meio do processamento da nuvem, foram geradas métricas de estrutura de dossel da área (Souza et al., 2025). As métricas consideradas no estudo foram: percentil 90 da altura de dossel (P90), razão do relevo do dossel (CRR) e cobertura do dossel acima



de 2 m de altura (Cover). Essas métricas refletem, respectivamente, a altura da vegetação, a rugosidade do dossel e a densidade da cobertura, atributos diretamente associados à dinâmica florestal. Todas as métricas foram geradas com 30 metros de resolução, formando um cubo de dados contendo 26689 observações (pixels).

As métricas de cada pixel da área de estudo foram processadas de forma a identificar a sua distância para uma floresta de referência madura, a partir de modelos de regressão Random Forest ajustados a partir do cruzamento de dados obtidos ao longo da bacia amazônica (Ometo et al., 2016; Urquiza-Munoz et al., 2024). Para a investigação dos padrões estruturais da vegetação, foram utilizados dados de métricas relativas, normalizados em relação à floresta de referência.

$$\text{Métrica Relativa} = 1 - \frac{\text{Métrica da floresta referência} - \text{Métrica observada}}{\text{Métrica da floresta referência}}$$

A clusterização dos dados foi conduzida por meio do algoritmo k-means. O número ótimo de *clusters* foi definido como $k = 7$, com base no método do cotovelo, que avalia a redução da variância intra-grupos (Total Within Sum of Squares). Para avaliar a significância estatística dos agrupamentos, foi aplicada a análise PERMANOVA considerando a distância euclidiana e 200 permutações. Com a finalidade de caracterizar a variação estrutural entre os agrupamentos obtidos, foi aplicada uma Análise de Componentes Principais (PCA) às métricas estruturais. A projeção dos dados no espaço formado pelas duas primeiras componentes principais permitiu a visualização da distribuição multivariada das observações. Os *clusters* previamente definidos foram utilizados como fator de agrupamento na visualização, sendo representados por elipses de confiança (nível de 95%) para destacar a separação entre os grupos. As métricas estruturais foram incluídas no *BIPLLOT* como vetores de contribuição, possibilitando a interpretação da influência relativa de cada variável na ordenação dos agrupamentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise PERMANOVA mostrou que os agrupamentos formados considerando sete grupos ($k = 7$) foram estatisticamente significativos, explicando 81% da variação nos dados ($R^2 = 0,81$; $p = 0,004$). O *Cluster 7*, com o maior número de pixels ($n = 17089$), foi o grupo mais semelhante à floresta de referência, com valores médios próximos de 1 para todas as métricas ($p90_{rel} = 0,997$; $crr_{rel} = 0,997$; $cover_{rel} = 1,000$), além dos menores desvios-



padrão. À medida que as florestas avançam na sucessão, a altura do dossel e área basal aumentam rapidamente, aproximando-se das características das florestas maduras (Peña-Carlos, 2003; Matsuo et al., 2021).

O *Cluster 1*, embora com valores de altura ($p90_{rel} = 0,963$) e cobertura ($cover_{rel} = 0,943$) próximos a de uma floresta referência, apresentou rugosidade distante da floresta referência ($crr_{rel} = 0,435$), o que pode indicar um dossel mais homogêneo e com menor complexidade vertical. Esse padrão é compatível com os estágios iniciais da sucessão, nos quais predominam árvores emergentes e dossel de crescimento rápido, contrastando com florestas maduras que apresentam maior diversidade vertical, com espécies de sub-bosque e estratos múltiplos de crescimento mais lento (Chazdon et al., 2010). Já o *Cluster 3* apresentou os menores valores médios de altura relativa ($p90_{rel} = 0,688$) e baixa rugosidade relativa ($crr_{rel} = 0,720$). Portanto, sugere-se que o *Cluster 3* representa florestas em estágio inicial de sucessão, sucedidas pelo *Cluster 1*, que apresenta maior desenvolvimento em altura e cobertura, mas ainda com baixa complexidade vertical. Os demais *clusters* (2, 4, 5 e 6) exibiram combinações distintas entre as métricas, representando diferentes perfis estruturais intermediários em relação à floresta madura (Tabela 1). Essa variação reflete a evolução estrutural da paisagem florestal dinâmica.

Tabela 1 – Média e desvio padrão de cada métrica relativa por *cluster*.

Clusters	n Pixels	P90 rel		CRR rel		Cover rel	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	58	0,963	0,057	0,435	0,166	0,943	0,089
2	3722	0,920	0,025	0,993	0,016	1,000	0,004
3	326	0,688	0,106	0,720	0,093	0,954	0,066
4	1265	0,955	0,051	0,790	0,049	0,981	0,035
5	1238	0,828	0,045	0,953	0,052	0,997	0,013
6	2991	0,989	0,022	0,908	0,030	0,996	0,014
7	17089	0,997	0,009	0,997	0,009	1,000	0,003

P90 rel: percentil 90 da altura, relativa a floresta referência; CRR rel: Razão do relevo do dossel, relativo a floresta referência; e Cover rel: Cobertura do dossel, relativo a floresta referência.

A Análise de Componentes Principais (PCA) revelou padrões na variação das métricas estruturais relativas a floresta referência ($p90_{rel}$, crr_{rel} e $cover_{rel}$), permitindo a visualização da distribuição dos *clusters* em um espaço multivariado reduzido (Figura 1).



As duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) explicaram a maior parte da variabilidade dos dados (97,9%), permitindo boa separação entre os agrupamentos.

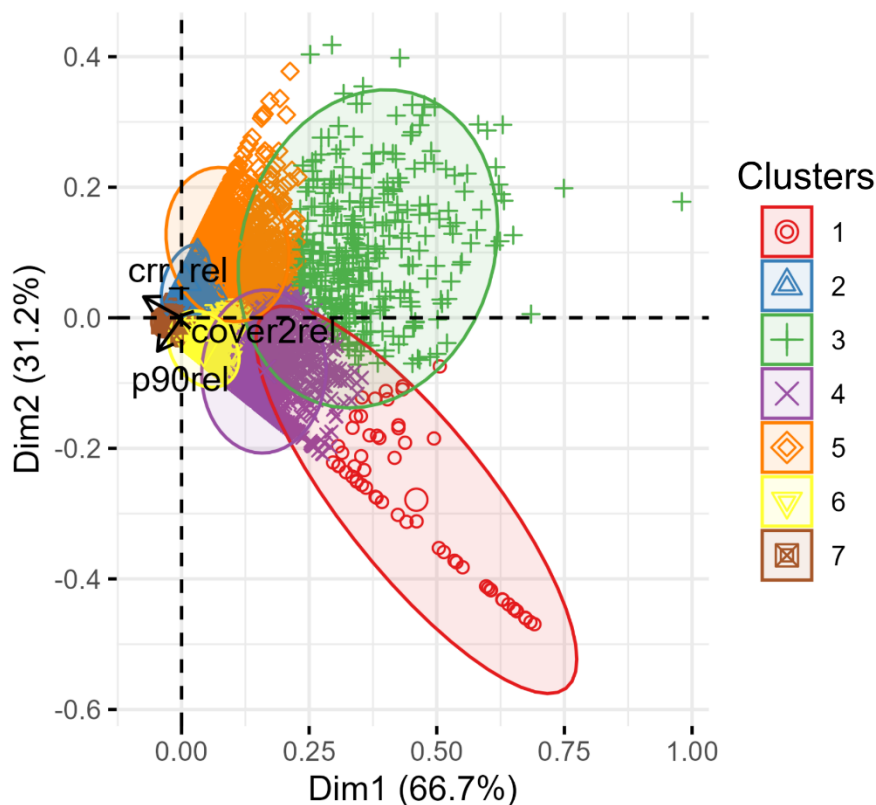


Figura 1 – Projeção dos 7 (sete) *clusters* obtidos pelo algoritmo *k-means* em um *BIPLLOT* da Análise de Componentes Principais (PCA). As elipses de confiança de 95% reforçam a separação visual entre os grupos no gráfico.

A análise dos coeficientes de correlação das componentes principais indicou que a PC1 foi fortemente influenciada pelo inverso da rugosidade do dossel (crr_rel; $-0,84$) e secundariamente pelo inverso da altura (p90rel; $-0,53$), representando um gradiente de estrutura vertical da floresta. Essa componente distingue áreas com dossel que apresentam altura e complexidade mais próximas a de uma floresta referência daquelas com estrutura mais simples e menor porte arbóreo. Como a camada do dossel é a mais lenta a se regenerar (Peña-Carlos et al., 2003), e maior diversidade de árvores tende a aumentar a complexidade do dossel (Fahey et al., 2025), a variação conjunta dessas métricas sugere que a separação entre os grupos está relacionada à maturidade estrutural da vegetação e, portanto, florestas mais estáveis.



Já a PC2 foi fortemente associada ao inverso altura relativa do dossel ($p90_{rel}$; $-0,85$) e secundariamente à rugosidade do dossel (crr_{rel} ; $0,53$), representando um gradiente de reorganização da estrutura vertical. Esse eixo pode indicar áreas onde a altura do dossel se distancia da média observada em florestas maduras, enquanto a complexidade estrutural aumenta, refletindo processos como competição por luz e a dinâmica sucessionais típicas de florestas tropicais (Clark et al., 2021; Brien, Zuidema 2006).

A terceira componente principal (PC3) foi fortemente associada à métrica de cobertura do dossel ($cover2_{rel}$; peso = $0,99$), indicando que essa dimensão capturou variações específicas relacionadas à densidade da cobertura. No entanto, como a PC3 explicou apenas 3% da variância total, sua contribuição para a separação multivariada dos grupos foi marginal. A influência limitada da $cover2_{rel}$ pode estar relacionada ao fato de que a cobertura do dossel tende a se estabilizar rapidamente e permanece relativamente constante ao longo dos diferentes estágios sucessionais (Clark et al., 2021), reduzindo sua capacidade de discriminar áreas com diferentes níveis de maturidade estrutural.

Com base nas características estruturais observadas, é possível inferir uma ordem sucessional entre os mosaicos florestais, partindo dos estágios iniciais até os mais avançados, com a seguinte sequência de *clusters*: 3, 1, 4, 6, 5, 2 e 7. Essa ordenação reflete um gradiente crescente de cobertura, altura e rugosidade do dossel.

CONCLUSÃO

As métricas de estrutura do dossel extraídas por LiDAR permitem distinguir manchas florestais na Amazônia Central, e parte dos *clusters* revelou padrões compatíveis com uma ordem sucessional. A altura e a rugosidade do dossel mostraram-se eficazes na diferenciação da estrutura da vegetação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, ao Max Planck Institute for Biogeochemistry e a Amazon Tall Tower Observatory.

REFERÊNCIAS

BOTTA, A.; FOLEY, J.A. Effects of climate variability and disturbances on the Amazonian terrestrial ecosystems dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 16, n. 4, p. 18-1-18-11, 2002.



- BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P.A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. *Journal of Ecology*, p. 481-493, 2006.
- CHAMBERS, J. Q.; NEGRON-JUAREZ, R. I.; MARRA, D. M.; DI VITTORIO, A.; TEWS, J.; ROBERTS, D.; ... HIGUCHI, N. The steady-state mosaic of disturbance and succession across an old-growth Central Amazon forest landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 10, p. 3949-3954, 2013.
- CHAZDON, R. L.; FINEGAN, B.; CAPERS, R. S.; SALGADO-NEGRET, B.; CASANOVES, F.; BOUKILI, V.; NORDEN, N. Composition and dynamics of functional groups of trees during tropical forest succession in northeastern Costa Rica. *Biotropica*, v. 42, n. 1, p. 31-40, 2010.
- CLARK, D. B.; OBERBAUER, S. F.; CLARK, D. A.; RYAN, M. G.; DUBAYAH, R. O. Physical structure and biological composition of canopies in tropical secondary and old-growth forests. *PloS one*, v. 16, n. 8, p. e0256571, 2021.
- FAHEY, C.; CHOI, D.; WANG, J.; DOMKE, G. M.; EDWARDS, J. D.; FEI, S.; ... PARKER, J. D. Canopy complexity drives positive effects of tree diversity on productivity in two tree diversity experiments. 2025.
- MARRA, D. M.; CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; TRUMBORE, S. E.; RIBEIRO, G. H.; DOS SANTOS, J.; ... WIRTH, C. Large-scale wind disturbances promote tree diversity in a Central Amazon forest. *PloS one*, v. 9, n. 8, p. e103711, 2014.
- MATSUO, T.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; BONGERS, F.; VAN DER SANDE, M. T.; POORTER, L. Forest structure drives changes in light heterogeneity during tropical secondary forest succession. *Journal of Ecology*, v. 109, n. 8, p. 2871-2884, 2021.
- MESQUITA, R. C.; ICKES, K.; GANADE, G.; WILLIAMSON, G. B. Alternative successional pathways in the Amazon Basin. *Journal of Ecology*, v. 89, n. 4, p. 528-537, 2001.
- MIRABEL, A.; MARCON, E.; HÉRAULT, B. 30 Years of postdisturbance recruitment in a Neotropical forest. *Ecology and Evolution*, v. 11, n. 21, p. 14448-14458, 2021.
- OMETTO, J. P.; GORGENS, E. B.; DE SOUZA PEREIRA, F. R.; SATO, L.; DE ASSIS, M. L. R.; CANTINHO, R.; ... KELLER, M.A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing. *Scientific Data*, v. 10, n. 1, p. 668, 2023.
- PEÑA-CLAROS, M. Changes in forest structure and species composition during secondary forest succession in the Bolivian Amazon1. *Biotropica*, v. 35, n. 4, p. 450-461, 2003.
- SILVA, C.V.D.J.; SANTOS, J.R.D.; GALVÃO, L.S.; SILVA, R.D.A.D.; MOURA, Y.M. Florística e estrutura de uma floresta primária e uma cronossequência de sucessão secundária na Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 46, p. 133-150, 2016.



SOUZA, A. F.; GORGENS, E.; MARRA, D. M.; KELLER, M.; TRUMBORE, S. Forest and topographic metrics derived from airborne laser scanning for the ATTO site (2021) [Data set]. *Max Planck Institute for Biogeochemistry*. 2025.

URQUIZA-MUÑOZ, J. D.; TRUMBORE, S.; NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; FENG, Y.; BRENNING, A.; VASQUEZ-PARANA, C. M.; MARRA, D. M. Increased occurrence of large-scale windthrows across the Amazon basin. *AGUAdvances*, v. 5, n. 6, p. e2023AV001030, 2024.