XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

ESTRUTURA VERTICAL E HETEROGENEIDADE DO DOSSEL DE UM REMANESCENTE DE MATA ATLÂNTICA NO SUL DA BAHIA A PARTIR DE LiDAR AEROTRANSPORTADO

João Guilherme Batista da Silva [1]; Fábio Farias Pereira [2]; Thomas Pugh [3]; Lauan Felipe de Rocha Oliveira [4]; Arthur Kauê Buarque da Silva [5]; Alysson Deodato Ferreira [6]; Johnny Cavalcante da Silva [7]; Lucas Ricardo Ferreira dos Santos [8] & Luiz Henrique da Silva [9]

RESUMO – A fragmentação da Mata Atlântica expõe seus remanescentes a efeitos de borda que alteram a estrutura do dossel, com consequências para biodiversidade e funcionamento florestal. Este trabalho caracteriza a estrutura vertical e a heterogeneidade do dossel de um remanescente no sul da Bahia (~14,47° S, 39,10° O) a partir de LiDAR aerotransportado de alta densidade (~65 pontos m^{-2}), em tiles amostrais distribuídos pelo sítio. Quantificamos altura do dossel, cobertura e perfil vertical de retornos, evidenciando um dossel maduro e fechado (altura média ~18,6 m, topo P95 ~29 m, emergentes acima de 30 m, cobertura ~90%) com forte heterogeneidade entre e dentro dos tiles, incluindo manchas de menor estatura compatíveis com degradação e clareiras. Os resultados demonstram o potencial do LiDAR para detectar e quantificar a degradação estrutural interna de fragmentos de Mata Atlântica.

ABSTRACT – Atlantic Forest fragmentation exposes forest remnants to edge effects that alter canopy structure, with consequences for biodiversity and ecosystem functioning. This study characterizes the vertical structure and canopy heterogeneity of an Atlantic Forest remnant in southern Bahia, Brazil (~14.47° S, 39.10° W), using high-density airborne LiDAR data (~65 points m^{-2}) collected over sample tiles distributed across the site. Canopy height, canopy cover, and the vertical distribution of LiDAR returns were quantified to assess structural variability. Results revealed a mature and predominantly closed canopy (mean canopy height ~18.6 m, P95 canopy top height ~29 m, emergent trees exceeding 30 m, and canopy cover of approximately 90%), combined with pronounced heterogeneity both among and within sampling tiles. Areas of reduced canopy height and cover were identified, consistent with structural degradation and canopy gaps. These findings demonstrate the potential of airborne LiDAR to detect and quantify internal structural degradation in

[1]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, joao.guilherme@ceca.ufal.br
[2]) Afiliação: Laboratótio de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, fabio.pereira@ceca.ufal.br
[3]) Afiliação: Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Lund, Suécia; Department of Earth and Environmental Sciences (MGeo), Lund University, Lund, Suécia, thomas.pugh@nateko.lu.se
[4]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, lauan.oliveira@ceca.ufal.br
[5]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, arthur.buarque@ceca.ufal.br
[6]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, alysson.ferreira@ceca.ufal.br
[7]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, johnny.silva@ceca.ufal.br
[8]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, lcsoztx@gmail.com
[9]) Afiliação: Laboratório de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil

Atlantic Forest fragments and provide valuable information for understanding forest condition and ecosystem services related to hydrological regulation.

Palavras-Chave – LiDAR; estrutura do dossel; fragmentação; Mata Atlântica; serviços ecossistêmicos na hidrologia.

INTRODUÇÃO

Os remanescentes de Mata Atlântica, em sua maioria pequenos e isolados (Ribeiro et al., 2009), estão sujeitos a efeitos de borda que reduzem a altura e a densidade do dossel, favorecem espécies pioneiras e alteram a estrutura vertical da floresta. A caracterização tridimensional dessa estrutura e de sua heterogeneidade interna é necessária para avaliar o grau de degradação e o valor de conservação dos fragmentos.

A estrutura vertical do dossel é um importante controle biofísico dos processos hidrológicos florestais. A distribuição da folhagem ao longo das alturas influencia a interceptação da precipitação, a geração de *throughfall* e *stemflow*, e consequentemente a infiltração e o escoamento superficial. Áreas fragmentadas ou com clareiras tendem a ter menor interceptação e maiores vazões rápidas de pico. Portanto, caracterizar a heterogeneidade do dossel via LiDAR fornece subsídios críticos para entender como florestas modificam a partição da chuva em escoamento e recarga de aquíferos.

No Nordeste, onde a segurança hídrica é estruturalmente frágil, os fragmentos de Mata Atlântica do litoral leste exercem papel desproporcional na regulação de mananciais. A estrutura vertical desses fragmentos governa a interceptação da chuva, a evapotranspiração e a infiltração, de modo que a degradação estrutural associada à fragmentação, como rebaixamento do dossel, abertura e perda de estratos, altera diretamente o balanço hídrico local. Quantificar essa estrutura é, portanto, quantificar um controle de primeira ordem sobre os serviços hidrológicos do fragmento.

O LiDAR aerotransportado descreve diretamente a estrutura vertical do dossel, permitindo distinguir núcleos florestais maduros de áreas degradadas a partir de métricas de altura, cobertura e perfil de retornos. Este trabalho aplica essa capacidade a um remanescente no sul da Bahia, com foco na heterogeneidade estrutural e nas assinaturas de borda.

MATERIAS E MÉTODOS

O sítio CON localiza-se no sul da Bahia (~14,47° S, 39,10° O; zona UTM 24S), em remanescente de Mata Atlântica sob relevo de morros costeiros (variação altimétrica de ~100 m na área analisada). Foi utilizado um levantamento de LiDAR aerotransportado do projeto Sustainable Landscapes Brasil (EMBRAPA), adquirido em 2015, com densidade de pulsos elevada (~65 pontos m^{-2}) e classificação de retornos em estratos (solo, vegetação baixa, média e alta), favorável à

caracterização estrutural. A aquisição é composta por tiles amostrais distribuídos pelo sítio (em um arranjo espacialmente disperso, cobrindo uma extensão da ordem de 8,5 × 9 km), e não por um recobrimento contínuo; as métricas reportadas são agregadas sobre esses tiles. Por se tratar de uma única data de aquisição, a análise é de caracterização, não de detecção de mudança.

As nuvens de pontos foram normalizadas pela altura do terreno, estimada a partir dos retornos classificados como solo, e os retornos com altura normalizada superior a 60 m foram descartados como ruído. Geramos modelos de altura de dossel (MAD) a 1 m de resolução e métricas de estrutura a 50 m. Define-se altura média do dossel como a média do MAD por célula, distinta da média de todos os retornos (enviesada para baixo pelo sub-bosque).

Caracterizamos a estrutura por meio da altura média do dossel, da altura do topo (P95), da cobertura de dossel (fração de área com altura superior a limiares crescentes) e da distribuição vertical dos retornos, interpretada como perfil aparente de folhagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de tiles amostrais (Figura 1) revela uma floresta estruturalmente heterogênea: núcleos densos e altos, com emergentes que ultrapassam 30 m, em contraste com manchas de menor estatura, compatíveis com clareiras e áreas degradadas. Esse contraste, observável tanto entre tiles quanto internamente a eles, é uma assinatura estrutural da perturbação em fragmentos de Mata Atlântica.

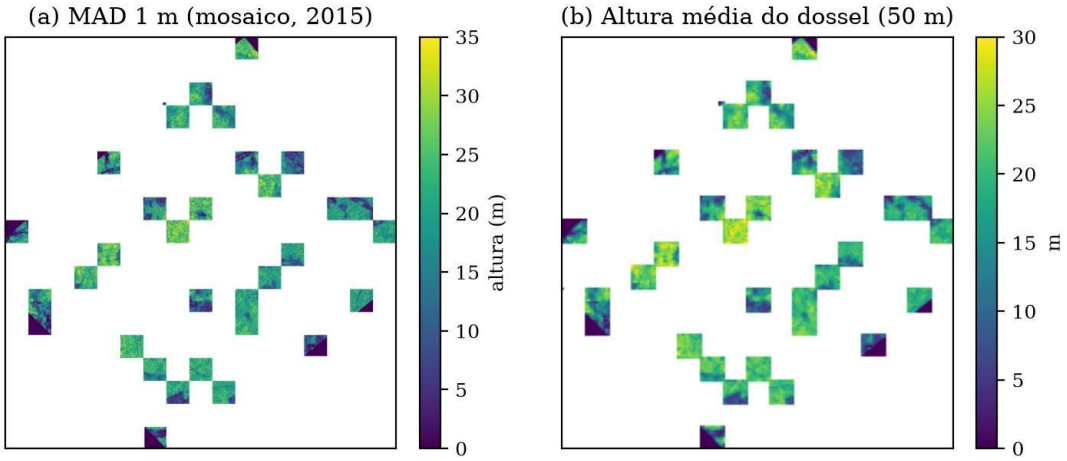


Figura 1 – (a) Modelo de altura de dossel a 1 m; (b) altura média do dossel a 50 m, evidenciando o contraste entre núcleos densos e manchas degradadas.

A distribuição de alturas e a curva de cobertura (Figura 2) indicam um dossel predominantemente fechado: cerca de 90% da área amostrada apresenta dossel acima de 5 m, com a maior parte da folhagem concentrada entre 10 e 25 m. A cauda inferior da distribuição e o pico próximo de zero correspondem a aberturas e áreas degradadas.

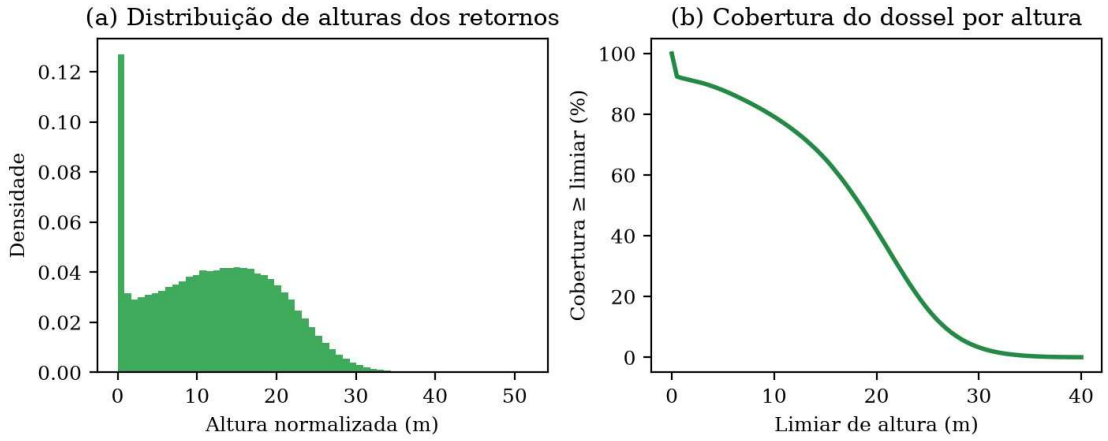


Figura 2 – (a) Distribuição das alturas normalizadas dos retornos; (b) cobertura do dossel em função do limiar de altura.

O perfil vertical (Figura 3) sintetiza a organização da folhagem ao longo da altura, com um estrato dominante de dossel e sub-bosque subjacente. Em fragmentos, a comparação entre perfis de núcleo e de borda permite quantificar o rebaixamento e a abertura associados ao efeito de borda.

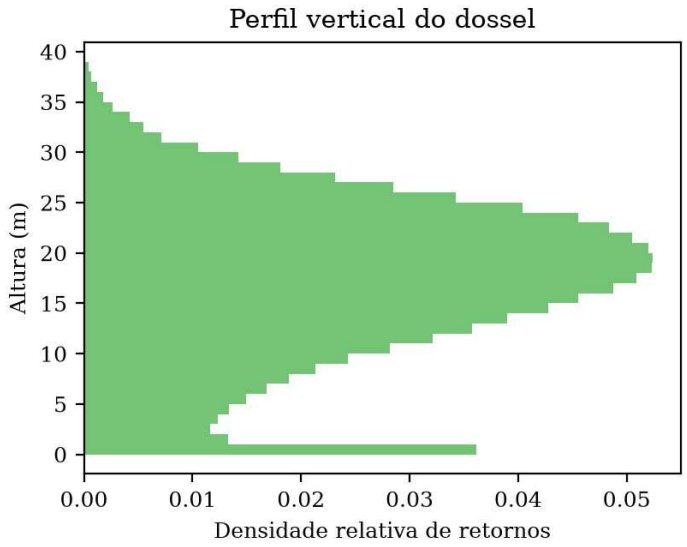


Figura 3 – Perfil vertical aparente do dossel (densidade relativa de retornos por faixa de altura).

Tabela 1 – Síntese das métricas estruturais e de carbono do sítio CON, agregadas sobre os tiles amostrais distribuídos pelo sítio.

Métrica	Valor
Altura média do dossel (m)	18,6
Mediana da altura (m)	19,3
Altura do topo, P95 (m)	29,0
Cobertura de dossel >5 m (%)	≈90
ACD média (kg C m^{-2})	12,6 ± 6,7

As métricas estruturais obtidas (altura média, variância de altura, distribuição vertical de área foliar) estão diretamente ligadas à eficiência do dossel em interceptar e redistribuir água da chuva.

Por exemplo, nas áreas amostradas com dossel mais homogêneo e fechado, espera-se maior interceptação da chuva pelo estrato arbóreo, reduzindo a energia cinética das gotas no solo e favorecendo infiltração lenta e perene. Isso sugere potencial para menor pico de vazão nos córregos próximos e maior armazenamento de água no perfil do solo. Em contrapartida, nas porções onde o dossel é mais heterogêneo (alta variabilidade de altura) ou degradado, há clareiras que permitem que a chuva atinja diretamente o solo. Nessas áreas, a chuva tende a gerar escoamentos superficiais mais intensos e concentrados, facilitando transporte de sedimentos (erosão) e diminuindo o tempo de resposta dos córregos a eventos de chuva.

A heterogeneidade estrutural observada tem leitura hidrológica direta. Manchas de menor estatura e de cobertura reduzida interceptam menos precipitação e expõem o sub-bosque a maior radiação, favorecendo o escoamento superficial e reduzindo a recarga; já os núcleos de dossel alto e fechado maximizam a interceptação e a evapotranspiração, atenuando picos de vazão. O contraste entre essas condições, mapeado pelo LiDAR, delineia um mosaico de respostas hidrológicas que médias de bacia não capturam. Isto é uma informação valiosa para o planejamento de restauração orientada à produção de água.

Mesmo sem medições diretas de fluxo, os produtos LiDAR indicam zonas de maior e menor risco hidrológico. Essa informação é útil para gestão de bacias florestadas: permite identificar regiões prioritárias para restauração (p.ex. fechar fragmentos) ou para estudos de campo adicionais de monitoramento hidrológico. Por exemplo, se um modelo hidrológico for calibrado, as variáveis de estrutura do dossel podem ser incorporadas nos módulos de interceptação e infiltração do modelo, melhorando a simulação de fluxos de água nos ecossistemas florestais.

Em termos práticos, o uso de LiDAR torna possível avaliar o impacto de projetos de manejo ou restauração sobre a regulação hídrica. Por exemplo, reintroduzir vegetação nas bordas pode aumentar a interceção de chuva ao longo de riachos, enquanto identificar clareiras extensas pode sinalizar locais de altos riscos de inundação em chuvas fortes. Esses insights estruturais complementam medidas tradicionais (chuva, vazão) e ajudam órgãos de recursos hídricos a planejar intervenções mais efetivas na manutenção da qualidade e quantidade de água em ambientes florestados.

LIMITAÇÕES

A atribuição quantitativa dos efeitos de borda requer a delimitação explícita das bordas do fragmento e o cálculo de gradientes borda–interior, aqui apenas indicados pelo contraste estrutural observado. A análise apoia-se em recobrimento parcial; a caracterização completa do fragmento requer o processamento de todos os tiles. Os efeitos de borda têm assinatura hidrológica própria:

margens mais quentes, secas e ventiladas elevam a demanda evaporativa e a mortalidade de árvores, retroalimentando a abertura do dossel. Em paisagens fragmentadas como a do sul da Bahia, a fração de área sob influência de borda pode ser elevada, de modo que a contabilidade dos serviços hidrológicos do fragmento exige considerar explicitamente essa zona de transição.

CONCLUSÕES

O LiDAR aerotransportado revelou a estrutura vertical e a heterogeneidade de um remanescente de Mata Atlântica no sul da Bahia, caracterizando um dossel maduro e fechado (cobertura ~90%, altura média ~18,6 m, emergentes acima de 30 m) com forte heterogeneidade entre e dentro dos tiles amostrais e manchas de menor estatura. Essa variabilidade estrutural constitui uma assinatura quantificável da perturbação, com valor direto para o diagnóstico e o monitoramento de fragmentos atlânticos no Nordeste.

AGRADECIMENTOS

Aos provedores dos dados do projeto Sustainable Landscapes Brasil (EMBRAPA) e às agências brasileiras de fomento à pesquisa.

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), através do projeto "Assessing the feasibility of integrating Atlantic Forest dynamics into the Tree2Globe global forest reanalysis system". Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento concedido via Chamada Universal 2025 para o projeto "Até que ponto herbívoros invertebrados influenciam a absorção de água e nitrogênio pelas plantas em florestas tropicais?", e pelo suporte no âmbito do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) "Bioinovações para Agricultura Sustentável".

REFERÊNCIAS

ASNER, G. P.; MASCARO, J. Mapping tropical forest carbon: calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. Remote Sensing of Environment, v. 140, p. 614–624, 2014.

BECKNELL, J. M. et al. Landscape-scale lidar analysis of aboveground biomass distribution in secondary tropical forests. Biotropica, v. 50, n. 3, p. 520–530, 2018.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global Change Biology, v. 20, p. 3177–3190, 2014.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Biological Conservation, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

SILVA, C. A. et al. Comparison of small- and large-footprint lidar characterization of tropical forest aboveground structure and biomass. IEEE J-STARS, v. 11, n. 10, 2018.