ESTOQUE DE CARBONO ACIMA DO SOLO DE UM REMANESCENTE DE MATA ATLÂNTICA NO SUL DA BAHIA ESTIMADO POR LiDAR AEROTRANSPORTADO

Lauan Felipe de Rocha Oliveira[1]; Fábio Farias Pereira [2] ; Thomas Pugh [3]; João Guilherme Batista da Silva [3]; 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 Mata Atlântica nordestina, embora altamente fragmentada, abriga estoques de carbono cuja quantificação espacial permanece limitada. Este trabalho estima a densidade de carbono acima do solo (ACD) de um remanescente de Mata Atlântica no sul da Bahia (~14,47° S, 39,10° O) a partir de um levantamento de LiDAR aerotransportado de alta densidade (~65 pontos m^{-2}) do projeto Sustainable Landscapes Brasil, composto por tiles amostrais distribuídos pelo sítio. Geramos modelos de altura de dossel a 1 m e estimamos a ACD a partir da altura média do dossel por um modelo da família altura-carbono. O remanescente apresentou dossel maduro e fechado (altura média ~18,6 m, topo P95 ~29 m, cobertura ~90%) e ACD média da ordem de 12,6 kg C m^{-2}, com forte heterogeneidade espacial entre e dentro dos tiles. Os resultados fornecem uma linha de base de carbono para o sítio e demonstram o potencial do LiDAR para o monitoramento de estoques em remanescentes atlânticos do Nordeste.

ABSTRACT – The Northeastern Atlantic Forest, although highly fragmented, contains significant carbon stocks whose spatial quantification remains limited. This study estimates the Aboveground Carbon Density (ACD) of an Atlantic Forest remnant in southern Bahia, Brazil (~14.47° S, 39.10° W), using a high-density airborne LiDAR survey (~65 points m^{-2}) from the Sustainable Landscapes Brazil project, consisting of sample tiles distributed across the site. We generated 1-m canopy height models and estimated ACD from mean canopy height using a height–carbon relationship model. The forest remnant exhibited a mature and closed canopy (mean height ~18.6 m, P95 top height ~29 m, canopy cover ~90%) and an average ACD of approximately 12.6 kg C m^{-2}, with strong spatial

[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, lauan.oliveira@ceca.ufal.br
[2]) 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
[3]) 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, joao.guilherme@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 — Doutorando do Programa de Pós-Graduação

heterogeneity both among and within the sampled tiles. The results provide a carbon baseline for the study area and demonstrate the potential of LiDAR for monitoring carbon stocks in Atlantic Forest remnants of Northeastern Brazil.

Palavras-Chave – LiDAR; carbono florestal; Bahia; densidade de biomassa; serviços hídricos de ecossistemas terrestres.

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é um dos biomas mais ameaçados do planeta, reduzida a uma pequena fração de sua extensão original e distribuída em fragmentos majoritariamente pequenos (Ribeiro et al., 2009). No Nordeste, esses remanescentes concentram-se no sul da Bahia, onde ainda persistem florestas estruturalmente complexas com estoques de carbono relevantes. A quantificação espacialmente explícita desses estoques é essencial tanto para inventários de carbono quanto para a priorização de áreas de conservação.

O LiDAR aerotransportado permite estimar a densidade de carbono acima do solo (ACD) a partir de métricas de altura do dossel, com modelos calibrados para florestas tropicais e atlânticas (Asner e Mascaro, 2014; Becknell et al., 2018). Este trabalho aplica essa abordagem a um remanescente de Mata Atlântica no sul da Bahia, com o objetivo de estabelecer uma linha de base de carbono e caracterizar sua distribuição espacial.

Além de sua importância para estoque de carbono, a distribuição espacial da biomassa acima do solo revela padrões de proteção hídrica do ecossistema. Florestas com biomassa elevada e dossel alto interceptam maior fração da chuva, aumentam a infiltração no solo e reduzem o escoamento superficial e a erosão. Assim, áreas com maior densidade de carbono tendem também a ser aquelas que desempenham papel-chave na regulação dos recursos hídricos da bacia. Essa perspectiva integra a análise de carbono ao planejamento de serviços ecossistêmicos hídricos (Tabela 1), identificando prioridades para conservação florestal visando mitigar enchentes e manter a disponibilidade de água.

Tabela 1 – Exemplos de métricas LiDAR de estrutura florestal e suas funções hidrológicas associadas.

Métrica LiDAR	O que indica	Função hidrológica esperada
Densidade de carbono (ACD) (Mg/ha)	Biomassa total, altura do dossel	Alta ACD ⇒ dossel alto/fechado: ↑ interceptação da chuva; ↑ transpiração; ↑ infiltração devido a raízes profundas; regulação de fluxo nos rios.

Altura média do dossel (m)	Desenvolvimento do dossel	Alturas maiores interceptam mais chuva. Proteção do solo reduz erosão.
Cobertura do dossel (%)	Fechamento da copa (LAI)	Cobertura maior ⇒ menor energia das gotas de chuva no solo, mais água retida na biomassa, maior homogeneidade da precipitação sob o dossel.
Variabilidade vertical (desvio padrão)	Heterogeneidade do dossel	Dossel altamente heterogêneo (muitos gaps) pode indicar áreas com maior escoamento local e perda de interceptação. Baixa variabilidade sugere floresta intacta com regulação hídrica consistente.

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).

A densidade de carbono acima do solo (ACD) foi estimada a partir da altura média do dossel (TCH) por um modelo de potência da família altura–carbono usada para florestas tropicais e atlânticas (Asner e Mascaro, 2014; Becknell et al., 2018). Ressalva: os coeficientes empregados são valores publicados aplicados sem recalibração local por inventário; as estimativas devem ser interpretadas como aproximações de primeira ordem, e a relação altura–ACD apresentada é, por construção, monotônica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura do dossel (Figura 1) revela uma floresta madura e fechada, com altura média de ~18,6 m (mediana ~19,3 m) e topo (P95) de ~29 m, com emergentes que ultrapassam 30 m. A ACD estimada (Figura 2a) é da ordem de 12,6 kg C m^{-2} em média (± 6,7), variando entre e dentro dos tiles amostrais, com os maiores valores nos núcleos de dossel mais alto. A relação altura–carbono (Figura 2b) é, por construção do modelo, monotônica e crescente.

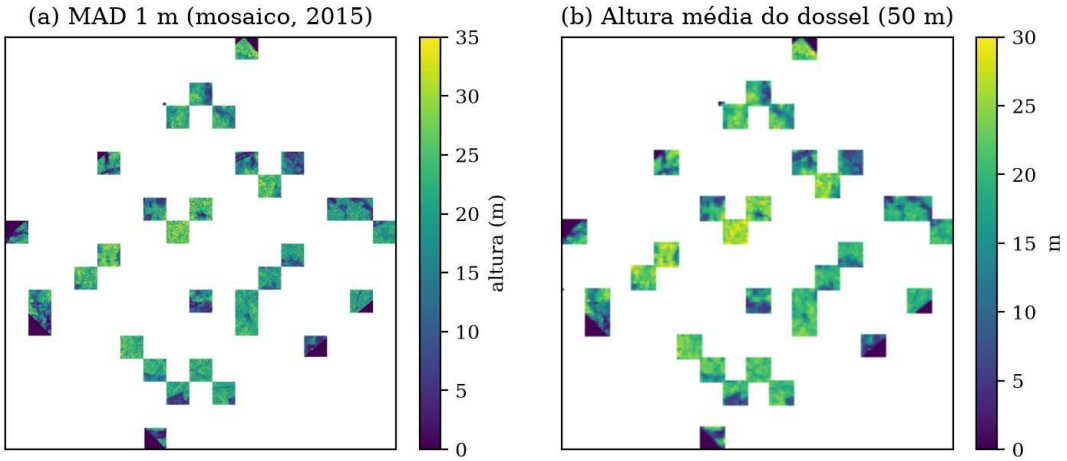


Figura 1 – Estrutura do dossel do sítio CON nos tiles amostrais distribuídos: (a) modelo de altura de dossel a 1 m; (b) altura média do dossel a 50 m.

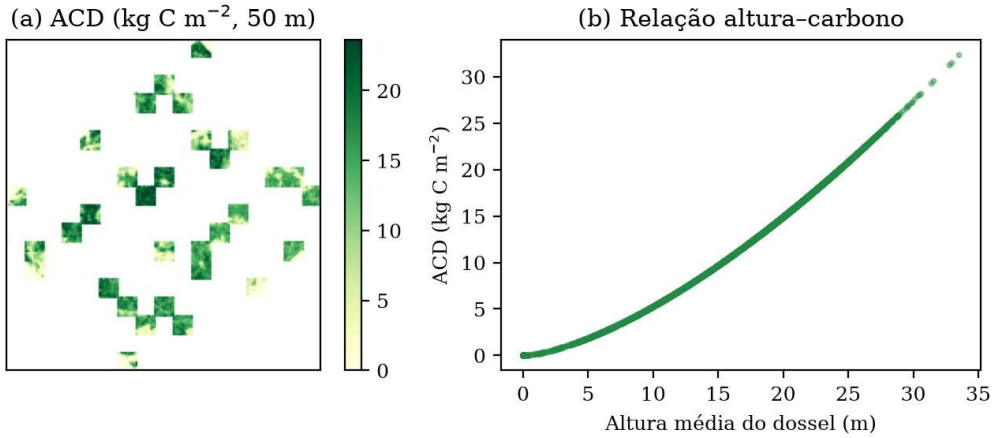


Figura 2 – (a) Densidade de carbono acima do solo (ACD) estimada a 50 m; (b) relação altura média–ACD.

A heterogeneidade espacial do carbono, isto é, a variação acentuada entre e dentro dos tiles amostrais, com manchas de menor estatura embutidas em uma matriz de dossel alto, é uma assinatura típica de fragmentos de Mata Atlântica sujeitos a perturbação e a efeitos de borda, e tem implicação direta para a contabilidade de carbono, já que as médias de área mascaram essa variabilidade. A Figura 3 ilustra a cadeia de processamento que sustenta as estimativas, sobre um levantamento real do sítio.

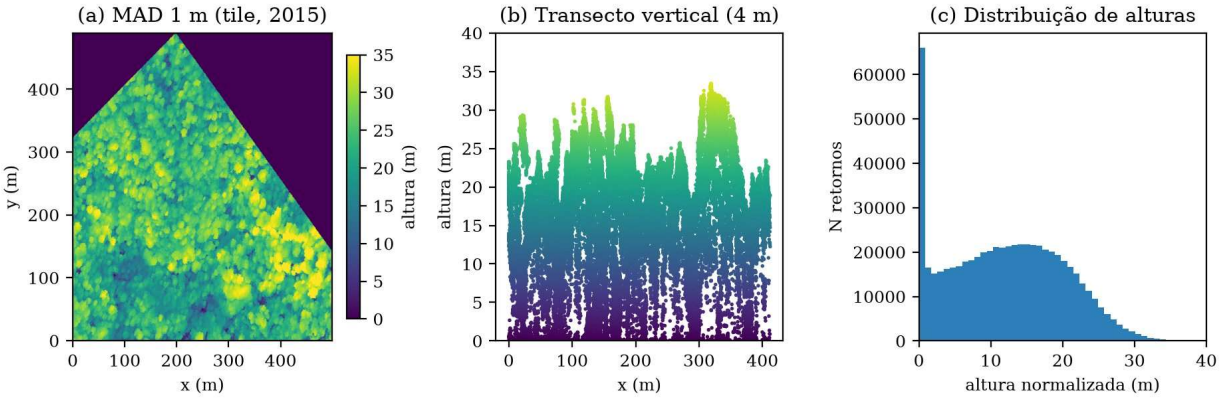


Figura 3 – Cadeia de processamento (dados reais de CON, 2015): (a) MAD a 1 m; (b) transecto vertical; (c) distribuição de alturas.

Tabela 2 – 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

Os resultados deste estudo fornecem insumos importantes para a gestão integrada de bacias. A heterogeneidade espacial dos estoques de carbono acima do solo reflete diferenças estruturais que afetam diretamente a hidrologia local. Áreas de floresta madura com altos valores de ACD apresentam dossel denso e contínuo, características associadas a maior interceptação da precipitação e atenuação de picos de cheia. Essa proteção das chuvas reduz o impacto erosivo sobre o solo e mantém a umidade do solo durante a estação seca, contribuindo para recarga de aquíferos e estabilidade do escoamento de base. Em contraste, trechos florestais degradados ou com dossel mais baixo, indicados por menores estoques de carbono, podem gerar aumento de escoamento rápido e transporte de sedimentos em eventos intensos.

Do ponto de vista da conservação de recursos hídricos, os mapas derivados de LiDAR podem orientar o zoneamento de áreas prioritárias. Por exemplo, setores com ACD mais alto podem ser

reconhecidos como “reservas” naturais de água, onde esforços de proteção e restauração florestal terão co-benefícios de qualidade e quantidade de água. Já regiões com baixa cobertura de carbono/sobre a superfície pode demandar ações de recuperação para evitar aumentos de turbidez nos rios e garantir reserva de umidade.

Além disso, a metodologia aqui apresentada facilita o monitoramento contínuo das áreas florestais. Em projetos de pagamentos por serviços ambientais (PSA) ou de preservação de mananciais, os dados LiDAR podem ser integrados a modelos hidrológicos distribuídos para simular cenários de uso da terra e prever ganhos de conservação de água. Por exemplo, incluir a variabilidade espacial de ACD em modelos de balanço hídrico pode melhorar a predição de escoamentos futuros e auxiliar no planejamento de infraestruturas verdes (como florestas ripárias) que maximizem a retenção de água.

LIMITAÇÕES

As estimativas de ACD baseiam-se em coeficientes publicados do modelo altura–carbono, sem recalibração local por inventário; constituem, portanto, aproximações de primeira ordem, e a relação altura–ACD é monotônica por construção. A análise apoia-se, ainda, em recobrimento parcial do sítio; a estimativa de estoque total requer o processamento do conjunto completo de tiles e validação por parcelas de campo.

CONCLUSÕES

A conservação dos remanescentes de Mata Atlântica desempenha papel estratégico para a manutenção da qualidade e da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro. A heterogeneidade espacial dos estoques de carbono observada neste estudo reflete diferenças estruturais do dossel que influenciam diretamente processos hidrológicos, como interceptação da chuva, infiltração e geração de escoamento superficial. Áreas com maiores valores de ACD tendem a coincidir com setores de floresta mais madura e estruturalmente complexa, os quais geralmente apresentam maior capacidade de regular fluxos de água e reduzir processos erosivos.

O LiDAR aerotransportado permitiu mapear a estrutura e estimar a ACD de um remanescente de Mata Atlântica no sul da Bahia. O sítio apresenta dossel maduro e fechado e ACD da ordem de 12 kg C m^{-2}, com forte heterogeneidade espacial associada a efeitos de borda. A abordagem fornece uma linha de base de carbono e demonstra a viabilidade do monitoramento de estoques em fragmentos de Mata Atlântica do Nordeste.

Os produtos derivados de LiDAR apresentados neste trabalho podem subsidiar estratégias integradas de conservação voltadas simultaneamente para o sequestro de carbono e para a proteção dos recursos hídricos.

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.