CONTRIBUIÇÕES E PERSPECTIVAS DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ARQUEOLOGIA E ECOLOGIA HISTÓRICA DA FLORESTA AMAZÔNICA

Vinicius Peripato[1], Jonas Gregório de Souza[2], Carolina Levis[3], Dani Gamerman[4], Guido Alberti Moreira[5], Adriana Maria da Silva[6], Aline Jacon[7], Débora Joana Dutra[7], Henrique Leão[1], Breno Izidoro Domingo[7], Luiz E. O. C. Aragão[1,7]

[1]Divisão de Observação da Terra e Geoinformática (DIOTG), Coordenação Geral de Ciências da Terra (CG-CT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil; vinicius.peripato@gmail.com; {paulo.leao; luiz.aragao}@inpe.br;
[2]Culture, Archaeology and Socio-Ecological Dynamics Research Group (CASEs), University Pompeu Fabra (UPF), Barcelona, Espanha; jonas.gregorio@upf.edu
[3]Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil; carollevis@gmail.com;
[4]Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil; dani@im.ufrj.br;
[5]Bavarian Nordic, Fraunhoferstr, Planegg, Alemanha; guidoalber@gmail.com;
[6]Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO), Instituto de Geografia (IG), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, Brasil; adrianamari@hotmail.com;
[7]Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PGSER), Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil; {aline.jacon; debora.joana; breno.domingos; luiz.aragao}@inpe.br;

RESUMO

O sensoriamento remoto tem transformado o estudo da arqueologia e ecologia histórica na Amazônia, revelando o impacto de longo prazo das sociedades pré-colombianas sobre a paisagem e a composição florestal. Tecnologias de sensores como o *Light Detection and Raning* (LiDAR) e o Radar de Abertura Sintética (SAR) possibilitam identificar áreas prováveis com estruturas arqueológicas e florestas domesticadas, anteriormente ocultas pelo dossel florestal, oferecendo uma visão detalhada do manejo indígena sobre a vegetação. Esse manejo, que incluiu a criação de solos férteis e a domesticação de espécies vegetais, moldou a ecologia da floresta, resultando em áreas com alta resiliência ecológica. Portanto, esse artigo apresenta como o sensoriamento remoto contribui para a compreensão do passado da floresta amazônica, e para o desenvolvimento de estratégias de conservação que podem ser utilizadas respeitando o conhecimento tradicional indígena que fortalece a resiliência da floresta frente as mudanças climáticas.

Palavras-chave: Arqueologia, Ecologia histórica, LiDAR, SAR

ABSTRACT

Remote sensing has transformed the study of archaeology and historical ecology in the Amazon, revealing the long-term impact of pre-Columbian societies on the landscape and forest composition. Sensor technologies like Light Detection and Ranging (LiDAR) and Synthetic Aperture Radar (SAR) enable the identification of probable areas with archaeological structures and domesticated forests, previously hidden by the forest canopy, providing detailed insights into indigenous management of vegetation. This management, which included creating fertile soils and domesticating plant species, shaped the forest's ecology, resulting in areas with high ecological resilience. This article, therefore, illustrates how remote sensing contributes to understanding the Amazon rainforest's past and developing conservation strategies that honor indigenous traditional knowledge, enhancing forest resilience against climate change.

Key words: *Archeology, Historical ecology, LiDAR, SAR*

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia tem sido habitada por sociedades humanas há pelo menos 12.000 anos, com um profundo impacto sobre a paisagem e a composição ecológica da floresta [1]. A floresta atual carrega marcas dessas interações entre humanos e o meio ambiente [2]. O desenvolvimento de paisagens domesticadas, sistemas agroflorestais e alterações no solo e relevo são práticas históricas do manejo tradicional indígena desenvolvidas desde o período pré-colombiano [3]. Essas paisagens domesticadas, após serem abandonadas com a chegada dos colonizadores, foram, ao longo do tempo, absorvidas e incorporadas no ecossistema e, consequentemente, atuaram na modelagem do que é percebido e valorizado como natureza na Amazônia [4].

Nos últimos anos, o sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta essencial para investigar os efeitos históricos dessa interação entre o homem e o ecossistema. Mesmo em sítios arqueológicos amplamente conhecidos e estudados, o uso de sensores ativos como o Radar de Abertura Sintética (SAR), e o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), tem revolucionado o conhecimento desses vestígios que persistem ao longo do tempo e revelam novas descobertas e conexões [5–13]. O caso da floresta Amazônica é um exemplo icônico, onde sociedades pré-colombianas moldaram a paisagem de maneiras ainda visíveis e mensuráveis por tecnologias de sensoriamento remoto [13].

Neste contexto, o estudo da ecologia histórica surge para integrar evidências arqueológicas, biológicas e ambientais para compreender como as ações humanas de longo prazo moldaram ecossistemas contemporâneos. Assim, as sociedades pré-colombianas foram agentes de transformação e influenciaram na dinâmica das paisagens habitadas. Na Amazônia, o sensoriamento remoto tem sido importante para

capturar a extensão dessas interações e suas implicações sobre a estrutura florestal.

Este artigo analisa as contribuições do sensoriamento remoto para o estudo da arqueologia e ecologia histórica na Amazônia, com foco nas inovações tecnológicas que possibilitaram novas descobertas sobre o manejo pré-colombiano e suas influências na ecologia atual. Para tanto, busca-se responder: (1) quais tecnologias de sensoriamento remoto são aplicadas na investigação da ecologia histórica e arqueologia amazônica? (2) como essas tecnologias têm revelado intervenções humanas pré-colombianas e suas influências no ambiente amazônico? (3) quais são as perspectivas futuras para o uso de tecnologias emergentes, como o LiDAR aerotransportado de alta resolução, na análise de paisagens antropogênicas? e (4) de que forma técnicas analíticas avançadas podem aprimorar a interpretação dos dados de sensoriamento remoto, ampliando o entendimento sobre as interações entre sociedades antigas e o ambiente amazônico?

2. A AMAZÔNIA PRÉ-COLOMBIANA E AS MODIFICAÇÕES NA PAISAGEM

A cronologia da presença humana na Amazônia mostra uma interação dinâmica e transformadora da paisagem antes da chegada dos europeus. Há cerca de 16.500 anos, as primeiras evidências de ocupação humana surgem na América do Sul, e por volta de 12.000 anos atrás, populações indígenas já estavam estabelecidas em toda a Amazônia [1]. Essas comunidades iniciais eram compostas por grupos de caçadores-coletores, com estilo de vida nômade e práticas que incluíam coleta de frutos e sementes, caça e uso de recursos hídricos próximos [3].

Com o decorrer dos anos, a interação com o meio ambiente também se intensificou. Por volta de 8.000 anos atrás, indícios de domesticação de espécies vegetais indicam um avanço significativo na modificação intencional da paisagem [14]. Com o desenvolvimento de técnicas de cultivo e a criação de paisagens domesticadas, os povos indígenas aumentaram a abundância de espécies úteis, como a mandioca e outras plantas de interesse alimentar [3].

Ao longo dos milênios, essa modificação da floresta amazônica resultou em um ambiente altamente alterado pela presença humana. Foram observadas evidências do surgimento de solos antropogênicos, como a terra preta, entre 6.000 e 2.000 anos atrás, indicando o manejo extensivo do solo e uma relação simbiótica entre o homem e a floresta [15]. Esses solos, ricos em nutrientes, permitiram o desenvolvimento de comunidades mais sedentárias e maiores.

Ao longo dos anos, essas antigas sociedades que se desenvolveram e constituíram diversas tradições indígenas posteriores à era comum adquiriram um profundo conhecimento de técnicas de movimentação de terra, dinâmica fluvial, enriquecimento do solo e ecologia de plantas e animais. Com este conhecimento, essas sociedades pré-colombianas criaram paisagens domesticadas mais produtivas para subsistência ao longo da Amazônia [1].

Com a chegada dos europeus nas Américas em 1492, diversos fatores foram responsáveis pelo colapso de diferentes sociedades indígenas. Assim, os locais onde essas sociedades habitavam foram abandonados e despovoados. Consequentemente, extensas áreas florestais que até então eram manejadas pelas sociedades indígenas pré-colombianas foram ao longo do tempo se regenerando.

Hoje, a ocupação humana atual marcada pelo desmatamento, leva à descoberta de diversos resquícios arqueológicos. A investigação desses legados de sociedades pré-colombianas ainda perceptíveis nos dias atuais na floresta Amazônica é realizada majoritariamente em pesquisas de campo, uma abordagem que demanda grande investimento humano e financeiro. No entanto, apesar das investigações *in loco* permitirem avanços importantes na ciência, elas têm escopo restrito. Evidências de pequeno porte, a exemplo dos artefatos líticos, cerâmica, madeira, ossos, pinturas e gravuras rupestres, ainda necessitam de pesquisas *in loco*. Por outro lado, as modificações pré-colombianas na paisagem, a exemplo de estruturas de terra, florestas domesticadas e a ocorrência de terra preta de índio são passíveis de identificação sob a óptica do sensoriamento remoto [13, 16–19]. Nesses casos, têm se utilizado métodos, técnicas, e sistemas sensores que permitem analisar em grande escala a dinâmica da ecologia histórica da interação humana na floresta amazônica, mesmo sob o denso dossel florestal.

3. CONTRIBUIÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO NA DETECÇÃO DE SÍTIOS ARQUEOLÓGICOS

A vasta cobertura vegetal da Amazônia sempre foi um desafio para arqueólogos, que dependiam de estudos de campo para descobrir vestígios de ocupação humana antiga. No entanto, com o desenvolvimento de tecnologias de sensoriamento remoto, como o LiDAR e o SAR, tornou-se possível investigar áreas amplas e de difícil acesso, identificando estruturas arqueológicas e estudando o impacto dessas modificações no ecossistema atual.

O LiDAR, um sensor óptico ativo sob plataformas aerotransportadas revolucionou a arqueologia amazônica, uma vez que os pulsos laser emitidos conseguem adentrar o denso dossel florestal, fornecendo dados de altíssima resolução sobre o relevo da floresta. Ao mapear o terreno em três dimensões, o LiDAR permite a visualização do relevo, que pode conter estruturas de terra, como geoglifos, montes e trincheiras, e estradas que antes estavam completamente escondidas pela cobertura vegetal, conforme a Figura 1. Este método combinado a uma abordagem de modelagem de nicho ecológico revelou, por exemplo, que ainda há mais de 10.000 estruturas de terra em toda a Amazônia, concentradas em menos de 20% da floresta, uma descoberta que indica uma densidade populacional e um grau de complexidade cultural muito maiores do que se imaginava [13]. A capacidade de

sensores LiDAR de expor essas estruturas, sem a necessidade de remoção de árvores ou desmatamento tem sido essencial para expandir o conhecimento sobre a organização territorial e o manejo da paisagem realizados por sociedades pré-colombianas, uma vez que esses dados também permitem analisar a estrutura florestal que foi domesticada no seu passado e regenerada.

Além do LiDAR, o uso de sensores ópticos passivos complementa essa análise em áreas onde a vegetação foi removida, capturando imagens de alta resolução que revelam padrões no solo indicativos de ocupação humana, como linhas de trincheiras e montes elevados [16]. Embora sejam limitados a áreas já degradadas, que removeram totalmente a vegetação cultivada e regenerada por povos pré-colombianos, esses sensores permitem a identificação de estruturas arqueológicas em áreas abertas, facilitando a análise da ocupação desses povos ao longo do arco do desmatamento, que totaliza aproximadamente 500 mil km^2.

O Radar de Abertura Sintética (SAR), outro sensor ativo, também já foi muito utilizado na prospecção arqueológica. Em florestas tropicais, já atuou no mapeamento do sítio de Angkor Wat no Camboja, e na América do Sul nas Linhas de Nazca no Peru. A diferença de materiais, floresta e rocha no sítio de Camboja, ou diferentes granulometrias do solo e rochas no Peru afetam o retroespalhamento registrado pelo sensor, tornando possível identificar tais feições [20]. No caso da Amazônia, esse sensor não é tão preciso devido à ausência de refinamentos arquitetônicos ou metalúrgicos monumentais, que não eram característicos das sociedades pré-colombianas amazônicas [1]. Porém, com a capacidade do retroespalhamento SAR em extrair informações referentes à estrutura florestal é possível diferenciar florestas maduras, que se desenvolveram sobre antigas áreas de ocupação pré-colombiana e são caracterizadas em inventários florestais por terem maior área basal, dossel menos emergente, e mais árvores de sub-bosque [21]. Por sensores orbitais, essas áreas também têm menor biomassa, altura e cobertura arbórea [17, 18]. Assim, sensores SAR, fornecendo informações e produtos *wall-to-wall*, podem também alavancar a investigação da extensão e influência da domesticação florestal pré-colombiana sobre a estrutura florestal contemporânea. Além disso, também há a expectativa que os próximos sensores SAR que operam em bandas com maior penetração no dossel (L e P), como o NISAR e BIOMASS, podendo atuar também na prospecção arqueológica da Amazônia.

O uso combinado destes sensores tem revelado um panorama mais complexo e detalhado da ocupação humana na Amazônia, mostrando que as sociedades pré-colombianas não apenas sobreviveram na floresta, mas também a modificaram de forma estratégica, criando um sistema agroflorestal único. O sensoriamento remoto tem possibilitado que arqueólogos, antropólogos e ecologistas investiguem a extensão dessas modificações em larga escala e avaliem sua influência sobre a biodiversidade e o funcionamento ecológico da Amazônia.

4. ECOLOGIA HISTÓRICA E A INFLUÊNCIA HUMANA NA COMPOSIÇÃO E COMPORTAMENTO FLORESTAL

A ecologia histórica é um campo interdisciplinar que explora a interação entre seres humanos e o ambiente ao longo do tempo, revelando como as atividades humanas moldaram os ecossistemas de forma duradoura. Em vez de ver a natureza como um sistema intocado, a ecologia histórica destaca as paisagens como produtos de práticas culturais e ecológicas acumuladas, que influenciam a biodiversidade e a estrutura dos ecossistemas atuais [4]. Na Amazônia, com a hiperdominância de espécies relacionadas ao manejo tradicional indígena é evidente o impacto da domesticação florestal na composição florestal atual [2].

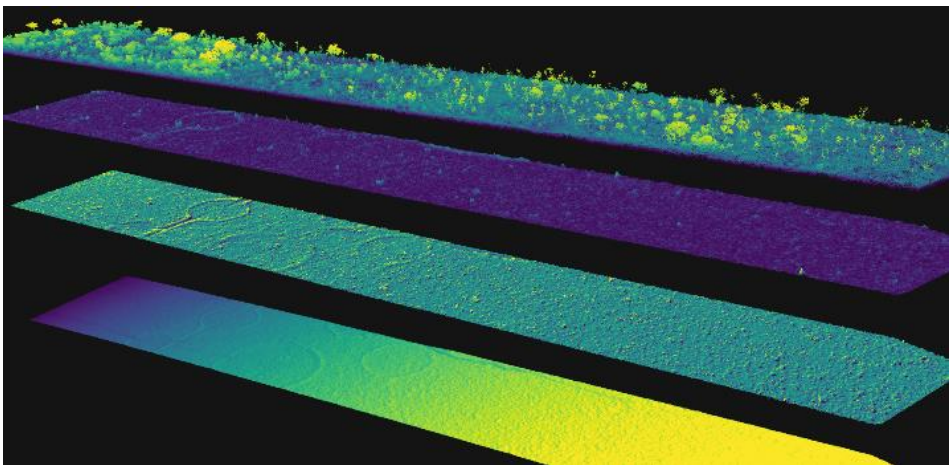


Figura 1. Dados de LiDAR para investigar estruturas de terra sob o dossel da floresta Amazônica. Da parte superior para a parte inferior na figura, a primeira é a nuvem de pontos LiDAR colorida de acordo com sua altura. Seguida pela declividade do relevo, sombreamento do relevo, e a elevação de um conjunto de estruturas de terra todos obtidos após a remoção digital dos elementos superficiais (floresta).

Na atualidade, a floresta Amazônica sofre pressões crescentes das mudanças climáticas, o que ameaça sua capacidade de funcionar como a detentora do maior reservatório de carbono tropical terrestre e a mais biodiversa do mundo. Assim, a floresta vem reduzindo sua capacidade no acúmulo de carbono ao longo das últimas décadas. Esse declínio é causado pela vulnerabilidade a eventos climáticos extremos cada vez mais intensos, impulsionados pelas mudanças climáticas [22]. No entanto, é possível que áreas onde houveram ocupação pré-colombiana ainda componham áreas mais resilientes a este

processo, uma vez que tradições indígenas pré-colombianas que utilizavam e desenvolviam sistemas de cultivo agroflorestal tiveram maior longevidade, superando até mesmo períodos de variabilidade climática [23].

Frente a esse cenário ainda é necessário definir o quão natural ou o quão manejada a floresta Amazônica se apresenta. Esse conhecimento trará maior compreensão na modelagem das respostas da vegetação tropical às atuais mudanças da composição atmosférica de gases de efeito estufa e climática, afetando diretamente a resiliência ambiental deste bioma [24]. Assim, ainda é crucial aprofundar o conhecimento sobre o desenvolvimento humano passado, junto com a sua dinâmica histórica, para melhor compreender as possíveis respostas da vegetação e assim ordenar tomadas de decisões para o futuro.

5. CONCLUSÃO

Este estudo ressalta como o sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta para expandir o conhecimento da arqueologia e ecologia histórica sobre territórios extensos. A partir de abordagens integradas é possível inferir e expandir a compreensão do manejo ancestral e suas influências na composição e dinâmica ecológica da floresta Amazônica. Com o uso de sensores ópticos e micro-ondas, é possível identificar evidências arqueológicas de ocupação e manejo, mesmo quando localizados sob áreas florestais densas, revelando legados persistentes no ecossistema. Com o advento de novos sensores SAR essa abordagem pode se expandir ainda mais a partir da análise estrutural da vegetação.

Entender o passado nos fornece as chaves para propor soluções eficazes para o futuro, integrando conhecimento tradicional e tecnologias modernas para promover um desenvolvimento sustentável e resiliente. Assim, é preciso ter o entendimento da ecologia histórica, e a compreensão de como esses legados de manejo pré-colombianos influenciam a resiliência da floresta frente às mudanças climáticas atuais. A capacidade do sensoriamento remoto de identificar áreas de ocupação antiga e monitorar sua ecologia oferece, assim, uma base sólida para futuras estratégias de conservação que respeitem e integrem o conhecimento tradicional na gestão sustentável da Amazônia. Portanto, diversos aspectos abordados já estão em pleno desenvolvimento em pesquisas atuais, buscando ampliar o entendimento sobre o manejo indígena tradicional e a resiliência ecológica da Amazônia.

6. AGRADECIMENTOS

Esse trabalho recebeu apoio do projeto *Mapping the Archaeological Pre-Columbian Heritage of South America* (MAPHSA). O MAPHSA é um projeto lidearado pela divisão de *Culture, Archaeology and Socio-Ecological Dynamics Research Group* (CASEs) da *University Pompeu Fabra* (UPF) financiado pela ARCADIA.

7. REFERÊNCIAS

[1] Neves, E. G. *et al.*, "Chapter 8: Peoples of the Amazon before European Colonization," in *Amazon Assessment Report 2021*, UN Sustainable Development Solutions Network, 2021.
[2] Levis, C. *et al.*, "Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition," *Science*, vol. 355, no. 6328, pp. 925–931, Mar. 2017.
[3] Levis, C. *et al.*, "How People Domesticated Amazonian Forests," *Front. Ecol. Evol.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–21, Jan. 2018.
[4] Erickson, C. L., "Amazonia: The Historical Ecology of a Domesticated Landscape," in *The Handbook of South American Archaeology*, New York, NY: Springer New York, 2008, pp. 157–183.
[5] Iriarte, J. *et al.*, "Geometry by Design: Contribution of Lidar to the Understanding of Settlement Patterns of the Mound Villages in SW Amazonia," *J. Comput. Appl. Archaeol.*, vol. 3, no. 1, pp. 151–169, Apr. 2020.
[6] Prümers, H.; Betancourt, C. J.; Iriarte, J.; Robinson, M.; and Schaich, M., "Lidar reveals pre-Hispanic low-density urbanism in the Bolivian Amazon," *Nature*, vol. 606, no. 7913, pp. 325–328, Jun. 2022.
[7] Canuto, M. A. *et al.*, "Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala," *Science*, vol. 361, no. 6409, Sep. 2018.
[8] Rostain, S. *et al.*, "Two thousand years of garden urbanism in the Upper Amazon," *Science*, vol. 383, no. 6679, pp. 183–189, Jan. 2024.
[9] Evans, D. H. *et al.*, "Uncovering archaeological landscapes at Angkor using lidar," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 110, no. 31, pp. 12595–12600, Jul. 2013.
[10] Bewley, R. H.; Crutchley, S. P.; and Shell, C. A., "New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site," *Antiquity*, vol. 79, no. 305, pp. 636–647, Sep. 2005.
[11] Masini, N. and Lasaponara, R., "Satellite and close range analysis for the surveillance and knowledge improvement of the Nasca geoglyphs," *Remote Sens. Environ.*, vol. 236, p. 111447, Jan. 2020.
[12] Auld-Thomas, L. *et al.*, "Running out of empty space: environmental lidar and the crowded ancient landscape of Campeche, Mexico," *Antiquity*, vol. 98, no. 401, pp. 1340–1358, Oct. 2024.
[13] Peripato, V. *et al.*, "More than 10,000 pre-Columbian earthworks are still hidden throughout Amazonia," *Science*, vol. 382, no. 6666, pp. 103–109, Oct. 2023.
[14] Clement, C. R. *et al.*, "The domestication of Amazonia before European conquest," *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 282, no. 1812, p. 20150813, Aug. 2015.
[15] Watling, J. *et al.*, "Direct archaeological evidence for Southwestern Amazonia as an early plant domestication and food production centre," *PLoS One*, vol. 13, no. 7, p. e0199868, Jul. 2018.
[16] de Souza, J. G. *et al.*, "Pre-Columbian earth-builders settled along the entire southern rim of the Amazon," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 1125, Mar. 2018.
[17] Palace, M. W. *et al.*, "Ancient Amazonian populations left lasting impacts on forest structure," *Ecosphere*, vol. 8, no. 12, Dec. 2017.
[18] McMichael, C. N. H. *et al.*, "Spatial and temporal abilities of proxies used to detect pre-Columbian Indigenous human activity in Amazonian ecosystems," *Quat. Sci. Rev.*, vol. 321, p. 108354, Dec. 2023.
[19] Söderström, M. *et al.*, "Sensor mapping of Amazonian Dark Earths in deforested croplands," *Geoderma*, vol. 281, pp. 58–68, Nov. 2016.
[20] Tapete, D. and Cigna, F., "COSMO-SkyMed SAR for Detection and Monitoring of Archaeological and Cultural Heritage Sites," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 11, 2019.
[21] de Oliveira, E. A. *et al.*, "Legacy of Amazonian Dark Earth soils on forest structure and species composition," *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 29, no. 9, pp. 1458–1473, Sep. 2020.
[22] Flores, B. M. *et al.*, "Critical transitions in the Amazon forest system," *Nature*, vol. 626, no. 7999, pp. 555–564, Feb. 2024.
[23] de Souza, J. G. *et al.*, "Climate change and cultural resilience in late pre-Columbian Amazonia," *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 3, no. 7, pp. 1007–1017, Jul. 2019.
[24] Brienen, R. J. W. *et al.*, "Long-term decline of the Amazon carbon sink," *Nature*, vol. 519, no. 7543, pp. 344–348, Mar. 2015.