

Potencial de Carbono

RESUMO

As mudanças climáticas e o desmatamento têm intensificado eventos extremos no Brasil, impactando ecossistemas, comunidades e a economia. Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma solução tecnológica aplicada pelo Banco do Brasil para identificar propriedades rurais com alto potencial de sequestro de carbono na Amazônia Legal, por meio da integração de dados do MapBiomass, Cadastro Ambiental Rural e sistemas de alerta de desmatamento. Foram elaborados cinco índices de sustentabilidade que combinam biomassa, risco de desmatamento e potencial de restauração, com base em modelos matemáticos e ecológicos. A ferramenta resultante permite análises espaciais, predição de risco e priorização de imóveis para atuação no mercado de crédito de carbono, alinhando-se ao Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). Os resultados indicam aumento da eficácia na prospecção de ativos ambientais, com impactos positivos na conservação de florestas e na mitigação das mudanças climáticas. A abordagem demonstra como instituições financeiras podem liderar inovações sustentáveis com base em ciência de dados, contribuindo para políticas públicas e os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: carbono, MapBiomass, inteligência artificial, desmatamento, crédito de carbono, sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos extremos que acometem o Brasil com crescente frequência e intensidade têm revelado a vulnerabilidade estrutural do país frente às mudanças climáticas globais. Fenômenos como enchentes urbanas em regiões metropolitanas, secas prolongadas no semiárido nordestino e incêndios florestais recorrentes na Amazônia e no Cerrado estão se tornando cada vez mais comuns (IPCC, 2023; Marengo et al., 2020). Nesse contexto, destaca-se o papel do desmatamento como fator crítico de retroalimentação das mudanças climáticas, sobretudo na região amazônica. A remoção da cobertura florestal reduz a capacidade do ecossistema de reciclar umidade via evapotranspiração, fragiliza os "rios voadores" (sprays de umidade transportados pela atmosfera) e pode induzir uma transição do clima regional para condições mais áridas (Lovejoy & Nobre, 2018; Zemp et al., 2017).

O agravamento do desmatamento contribui para a emissão de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por cerca de 46% das emissões nacionais em 2021, segundo o SEEG (2022). Em resposta, o governo brasileiro tem adotado

iniciativas regulatórias e de mercado voltadas à redução de emissões, como a recente Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Essa legislação visa estabelecer metas de emissão setoriais e viabilizar mecanismos de compensação através da comercialização de créditos de carbono, fomentando um mercado verde nacional e internacional.

Nesse cenário, o Banco do Brasil (BB) tem se posicionado de forma proativa e inovadora, atuando na vanguarda das soluções financeiras sustentáveis. Uma das principais iniciativas da instituição é a construção de uma solução tecnológica baseada em dados de sensoriamento remoto, Inteligência Artificial (IA) e geoprocessamento para identificar propriedades com alto potencial de sequestro de carbono, com foco na geração de créditos de carbono.

A solução desenvolvida pelo BB utiliza como base os dados do MapBiomass, uma das plataformas mais robustas e cientificamente validadas de monitoramento do uso e cobertura da terra no Brasil (Souza et al., 2020). A partir da integração dos dados de desmatamento e dos mapas anuais de estoques de carbono orgânico do solo gerados pelo MapBiomass, o BB aplica modelos analíticos e análises estatísticas para estimar o potencial de sequestro de carbono em propriedades rurais com base no Cadastro Ambiental Rural (CAR).

O diferencial da solução é a capacidade de agregar à análise o risco de desmatamento nas áreas circunvizinhas, permitindo hierarquizar as propriedades não apenas pela sua biomassa atual e potencial, mas também pela pressão antrópica. Essa abordagem permite identificar com maior acurácia propriedades prioritárias para conservação e para projetos de carbono.

Ademais, a iniciativa contribui para a geração de valor compartilhado, ao combinar ganhos financeiros para os proprietários de terra por meio da venda de créditos com benefícios climáticos e socioambientais. Projetos de carbono florestal têm demonstrado potencial significativo para conservação de ecossistemas e redução de desigualdades sociais (Silva-Chávez et al., 2021).

O Banco do Brasil, atualmente, apoia projetos que preservam mais de 755 mil hectares de floresta nativa, com a meta de conservar ou reflorestar 1 milhão de hectares até 2025. A solução mapeia mais de 24 milhões de hectares na Amazônia Legal, cruzando as informações com sua base de clientes para promover a mobilização de ativos verdes.

Segundo estimativas do ICC Brasil (2023), o mercado de carbono pode movimentar cerca de US\$ 100 bilhões no Brasil até 2030. Para o cientista Paulo Artaxo (FAPESP), os serviços ecossistêmicos prestados pela Amazônia equivalem a aproximadamente US\$ 14 trilhões, reforçando a relevância econômica de sua preservação.

Com essa iniciativa, o BB consolida seu papel de liderança na interseção entre sustentabilidade e tecnologia financeira, promovendo um modelo de

desenvolvimento compatível com a urgência climática e com a inclusão socioeconômica no campo.

OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho é desenvolver, aplicar e validar uma metodologia baseada em inteligência artificial e geotecnologias para a identificação de propriedades rurais com alto potencial de sequestro de carbono e risco de desmatamento na Amazônia Legal, com vistas à geração de créditos de carbono e promoção da sustentabilidade territorial.

Os objetivos específicos incluem:

- Integrar dados do MapBiomas, CAR e sistemas de alerta de desmatamento para análise espacial em escala de propriedade;

- Desenvolver e aplicar cinco índices de sustentabilidade (ICL, IES, IEC, IS, IQ) baseados em dados biofísicos e espaciais;

- Avaliar a distribuição e a correlação entre os índices e as pressões antrópicas regionais;

- Estruturar uma ferramenta interativa para apoiar a prospecção de clientes e imóveis prioritários no Banco do Brasil;

- Contribuir com subsídios técnicos para políticas públicas e iniciativas de mercado de carbono, especialmente no âmbito do SBCE.

DESCRIÇÃO

O projeto desenvolvido pelo Banco do Brasil tem como escopo central a identificação e priorização de propriedades rurais com elevado potencial de sequestro de carbono no solo, com foco na geração de créditos de carbono no contexto do mercado voluntário e regulado. A estratégia adotada baseia-se na aplicação de técnicas avançadas de análise geoespacial, inteligência artificial e sensoriamento remoto, utilizando como insumo principal os dados disponibilizados pelo MapBiomas — um consórcio de instituições acadêmicas, organizações da sociedade civil e empresas de tecnologia voltado ao monitoramento da cobertura e uso da terra no Brasil (Souza et al., 2020).

O MapBiomas disponibilizou sua coleção anual de mapas de estoques de carbono orgânico do solo, abrangendo o período de 1985 a 2022. Essa base de dados foi construída com mais de 20 mil amostras de solo provenientes de 247 bancos de dados integrados ao repositório SoilData, e considera uma série de covariáveis ambientais, como tipo de uso da terra, precipitação, textura do solo e altitude (MapBiomas Solos, 2023). A estimativa dos estoques de carbono

é realizada com o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, principalmente o Random Forest, técnica amplamente reconhecida na literatura por sua robustez em predições com múltiplas variáveis ambientais (Breiman, 2001; Grinand et al., 2017). No projeto do Banco do Brasil, esses dados são integrados a um modelo analítico que correlaciona os estoques de carbono com os registros do Cadastro Ambiental Rural (CAR), possibilitando a caracterização individualizada das propriedades.

Adicionalmente, a solução incorpora dados de desmatamento oriundos de fontes oficiais e independentes, com destaque para os sistemas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), como o PRODES e o DETER, além dos alertas do MapBiomas Alerta. Essa integração permite a identificação de hotspots de pressão antrópica, que são utilizados para construir índices de risco de desmatamento no entorno das propriedades.

A análise da proximidade de áreas desmatadas — por meio da construção de buffers de 50 km e 100 km — permite ponderar o potencial de ameaça ao estoque de carbono, associando propriedades com maior biomassa a áreas mais críticas. Essa abordagem é essencial, dado que propriedades localizadas em zonas de transição ou fronteira agrícola tendem a apresentar maior risco de conversão do uso do solo (Silva Junior et al., 2020).

Com base nesses dados, foram desenvolvidos cinco índices estatísticos que combinam informações sobre biomassa, risco de desmatamento e capacidade de crescimento florestal, permitindo uma classificação hierárquica das propriedades. Esses índices têm fundamentação em modelos matemáticos de crescimento logístico e exponencial, refletindo tanto o estoque atual de carbono quanto seu potencial de aumento ao longo do tempo.

Esses índices são visualizados em painéis interativos desenvolvidos em Power BI, que permitem aos analistas de relacionamento do banco filtrar clientes com maior potencial de engajamento em projetos de carbono. A ferramenta facilita a prospecção de clientes, a elaboração de propostas e o direcionamento de investimentos sustentáveis.

Ao integrar as dimensões climática, espacial e econômica, o projeto se destaca como uma solução pioneira no uso de tecnologias de ponta para fomentar a transição para uma economia de baixo carbono no setor financeiro. A abordagem do BB também contribui com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre), promovendo um modelo de desenvolvimento capaz de conciliar produtividade, conservação e resiliência.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para operacionalizar a análise do potencial de sequestro de carbono e risco ambiental em propriedades da Amazônia Legal, este estudo estruturou um

conjunto de cinco índices compostos com base em dados de biomassa, desmatamento e regeneração florestal. Os índices foram elaborados para capturar diferentes dimensões da sustentabilidade ecológica em nível de propriedade rural. As variáveis foram derivadas a partir da combinação de informações do MapBiomas Solos (2023), Cadastro Ambiental Rural (CAR) e sistemas de alerta de desmatamento (INPE/MapBiomas Alerta).

Inicialmente, foi calculado o déficit de biomassa (D_0), que representa a proporção da biomassa potencial ausente na paisagem ao redor da propriedade em razão do desmatamento. A fórmula empregada foi:

$$D_0 = \frac{A_D}{A_0} \times P_0$$

em que A_D representa a área desmatada no buffer (50 km ou 100 km), A_0 a área total da propriedade e P_0 a biomassa atual da propriedade. Este cálculo permitiu considerar o contexto espacial da propriedade, reconhecendo a influência das pressões antrópicas no entorno.

Com base nesse valor, cinco índices foram definidos:

O Índice de Crescimento Logístico (ICL) modela o potencial de crescimento da biomassa ao longo do tempo, considerando uma função logística. O valor de capacidade de carga (K) é dado por:

$$K = P_0 + D_0$$

assumindo que a biomassa ausente poderia ser restaurada. O crescimento ao longo do tempo é modelado por:

$$P(t) = \frac{K}{\left[1 + \left(\frac{K - P_0}{P_0}\right) \times e^{(-r \times t)}\right]}$$

em que representa a taxa de crescimento da biomassa, baseada no estudo de Almeida (2023). Este índice é fundamentado no conceito de resiliência ecológica proposto por Holling (1973) e tem aplicação em contextos de avaliação do potencial de restauração florestal (Chazdon et al., 2016).

O Índice Exponencial Simples (IES), definido por:

$$IES = P_0^{D_0}$$

avalia a exposição da biomassa ao risco ambiental associado ao desmatamento. Quanto maior o déficit de biomassa, maior o peso sobre a biomassa existente. Esse índice é sensível a pressões externas e pode apoiar a priorização de propriedades em áreas vulneráveis (Soares-Filho et al., 2006).

O Índice Exponencial Composto (IEC), dado por:

$$IEC = P_0^{1+D_0}$$

inclui não apenas o risco ambiental, mas também a capacidade de recuperação. Esse índice reflete o potencial de prestação de serviços ecossistêmicos como regulação climática e conservação da biodiversidade.

O Índice Soma (IS), calculado por:

$$IS = P_0 + D_0$$

representa o valor absoluto de biomassa existente e potencial. Trata-se de uma métrica direta para estimar o estoque total de carbono passível de conservação ou regeneração. Este índice é relevante na definição de metas quantitativas de restauração florestal (Lamb et al., 2005).

O Índice Quartis (IQ) classifica as propriedades em quartis com base na biomassa e no déficit de biomassa:

$$IQ = Q(P_0) + Q(D_0)$$

com valores de 1 a 4 para cada variável. Essa abordagem permite identificar propriedades com alto valor ecológico e alto risco, favorecendo decisões mais equitativas em ações de conservação (Margules & Pressey, 2000).

Os índices foram calculados para um conjunto de propriedades com base em análises espaciais realizadas por meio de scripts e processos de geoprocessamentos integrados em painéis interativos desenvolvidos em Power BI. Foram realizadas análises descritivas para avaliação da distribuição dos índices, bem como correlações entre eles e variáveis ambientais (área desmatada recente, cobertura florestal, presença de passivo ambiental). Essa abordagem permitiu validar a robustez dos indicadores e orientar estratégias operacionais do Banco do Brasil na prospecção de ativos verdes.

RESULTADOS

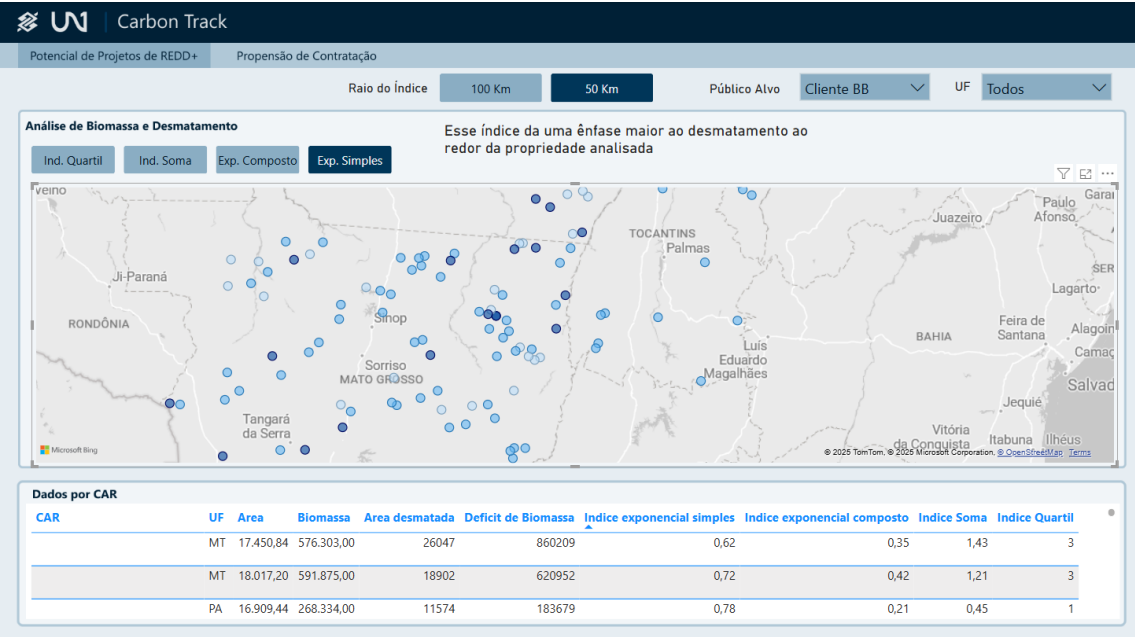
A aplicação dos índices de sustentabilidade desenvolvidos neste projeto permitiu a identificação precisa de propriedades com alto potencial de sequestro de carbono e sob significativa pressão de desmatamento. A análise espacial realizada com os dados do MapBiomas Solos, associada ao Cadastro Ambiental Rural (CAR), possibilitou a classificação de milhares de imóveis rurais na Amazônia Legal em categorias hierárquicas, segundo critérios ambientais robustos.

Ao cruzar os dados dos índices com as camadas de alerta de desmatamento (PRODES, DETER e MapBiomas Alerta), foi possível estabelecer um sistema

de monitoramento preditivo, com destaque para propriedades em zonas de expansão agrícola, como os estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia.

A integração dos cinco índices desenvolvidos resultou em uma ferramenta operacional implementada no Banco do Brasil por meio de painéis interativos em Power BI (Figura 1). Essa solução permite que as equipes de negócios e relacionamento priorizem o contato com clientes que possuem propriedades com alto potencial de retorno climático e econômico. Com isso, o tempo de resposta na prospecção de projetos elegíveis para crédito de carbono foi reduzido significativamente, aumentando a assertividade da atuação do banco no mercado de ativos ambientais.

Figura 1 – Painel final utilizado pelo Banco do Brasil



Do ponto de vista institucional, o projeto já contribuiu diretamente para o alcance da meta de conservar ou reflorestar 1 milhão de hectares até 2025, conforme o compromisso de sustentabilidade assumido pelo BB. Atualmente, o banco já apoia iniciativas que abrangem 755 mil hectares de floresta nativa preservada. Além disso, a solução tem potencial para escalar seus impactos por meio de parcerias com empresas de tecnologia, cooperativas agrícolas e entidades certificadoras de carbono.

A relevância do projeto também se manifesta em termos de impacto regulatório e alinhamento com políticas públicas. A ferramenta está em conformidade com os marcos estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e pode apoiar a definição de metas setoriais e critérios técnicos para elegibilidade de projetos no âmbito do mercado de carbono regulado.

No plano global, a inovação posiciona o Banco do Brasil como líder entre as instituições financeiras na adoção de tecnologia e ciência de dados para

enfrentar a crise climática. A iniciativa dialoga diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 13 (Ação Climática) e ODS 15 (Vida Terrestre), além de demonstrar como soluções baseadas na natureza podem ser operacionalizadas com inteligência artificial, ciência e geotecnologias.

A escalabilidade da metodologia desenvolvida é um dos principais legados do projeto. Os índices podem ser aplicados a outras regiões brasileiras ou tropicais, com ajustes mínimos nas variáveis de entrada. Assim, o projeto representa não apenas uma inovação técnica e institucional, mas também um modelo replicável de articulação entre ciência, finanças e conservação ambiental.

REFERÊNCIAS

Breiman, L. (2001). "Random forests." *Machine learning*, 45(1), 5-32.

Chazdon, R. L., et al. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 2(5), e1501286.

DE ALMEIDA, Catherine Torres, et al. Taxa de crescimento da biomassa acima do solo em florestas secundárias amazônicas estimada por sensoriamento remoto LIDAR e hiperespectral. *Anais...*, 2023.

Grinand, C., et al. (2017). "Estimating soil organic carbon stocks using soil information and environmental variables in a tropical agricultural landscape of Madagascar." *Geoderma*, 300, 29-38.

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1–23.

ICC Brasil (2023). "Mercado de Carbono: Potencial para o Brasil." <https://www.iccbrasil.org>

IPCC (2023). Sixth Assessment Report (AR6). <https://www.ipcc.ch>

Lamb, D., Erskine, P. D., & Parrotta, J. A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 310(5754), 1628–1631.

Lovejoy, T. E., & Nobre, C. (2018). "Amazon tipping point: Last chance for action." *Science Advances*, 4(2), eaat2340.

MapBiomass Solos (2023). "Estoque de carbono orgânico no solo do Brasil". <https://brasil.mapbiomas.org>

MapBiomass Solos. (2023). Estoque de carbono orgânico no solo do Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>

Marengo, J.A., et al. (2020). "Extreme Climate Events in the Amazon Basin." *Climate*, 8(3), 1-24.

Margules, C. R., & Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405(6783), 243–253.

Meyer, H., Reudenbach, C., Hengl, T., Katurji, M., & Nauss, T. (2018). "Improving performance of spatio-temporal machine learning models using forward feature selection and target-oriented validation." *Environmental Modelling & Software*, 101, 1-9.

SEEG (2022). "Emissões de GEE no Brasil." <http://seeg.eco.br>

Silva Junior, C. H. L., et al. (2020). "Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses." *Science Advances*, 6(40), eaaz8360.

Silva-Chávez, G., et al. (2021). "The Future of Forest Carbon Markets: New Insights and Recommendations." *Forest Trends*.

Soares-Filho, B. S., et al. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520–523.

Souza, C. M., et al. (2020). "Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazil using the MapBiomas dataset." *Science Data*, 7(1), 1-9.

Wunder, S. (2005). Payments for environmental services: Some nuts and bolts. *CIFOR Occasional Paper*, (42).

Zemp, D. C., et al. (2017). "Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks." *Nature Communications*, 8(1), 14681.