

MODELAGEM INTEGRADA DA RESILIÊNCIA TERRITORIAL NA FRONTEIRA CERRADO-AMAZÔNIA: UMA ABORDAGEM MULTIESCALAR, MULTITEMPORAL E PREDITIVA COM TÉCNICAS AVANÇADAS DE GEOPROCESSAMENTO E APRENDIZADO DE MÁQUINA

Wosney Ramos de Souza¹
Giovanni de Araújo Boggione¹
Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA¹

RESUMO

A Zona de Convergência Socioecológica Cerrado–Amazônia (ZCS) constitui uma das regiões mais sensíveis do Brasil em termos de dinâmicas socioambientais, marcada pela expansão agropecuária, o desmatamento, as queimadas e as pressões sobre populações tradicionais. Este estudo tem como objetivo investigar os padrões espaciais e temporais das transições territoriais, propondo um modelo multiescalar e preditivo de resiliência. Metodologicamente, integra-se dados de uso e cobertura da terra (MapBiomas), desmatamento e queimadas (INPE), além de indicadores socioeconômicos (IBGE, IPEA), processados em plataformas de geoprocessamento (QGIS, PostgreSQL/PostGIS, Google Earth Engine) e analisados por algoritmos de aprendizado de máquina (Random Forest, SVM, redes neurais profundas). As etapas incluem o cálculo de métricas de paisagem, a análise de clusters espaciais, a simulação de cenários futuros (CA-Markov e ABM) e o desenvolvimento de uma plataforma interativa de apoio à decisão territorial. Resultados preliminares apontam para a possibilidade de mapear tipologias de transição socioambiental, construir um índice de resiliência territorial e projetar cenários até 2035, fornecendo subsídios a gestores públicos para estratégias de governança ambiental. Conclui-se que a abordagem proposta contribui para o planejamento regional sustentável, articulando ciência, política e sociedade civil.

Palavras-chave: Resiliência Territorial; Cerrado-Amazônia; Geoprocessamento; Machine Learning.

INTRODUÇÃO

A Zona de Convergência Socioecológica Cerrado - Amazônia, conforme Figura 1, é uma região crítica que abriga 255 municípios e requer uma abordagem integrada para garantir a resiliência territorial, considerando a complexidade dos fatores socioambientais, econômicos e ecológicos.

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente da Universidade Evangélica de Goiás — UniEVANGÉLICA. E-mail: wrd.souza@gmail.com.

Doutor. Professor e pesquisador na Universidade Evangélica de Goiás — UniEVANGÉLICA, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente. E-mail: giovanni.boggione@gmail.com.

Figura 1: Zona de Convergência Socioecológica Cerrado – Amazônia (ZCS)



Fonte: Os autores, 2025.

A resiliência territorial, nesse contexto, diz respeito à capacidade dos sistemas socioecológicos locais de resistir, adaptar-se e recuperar-se diante de perturbações como o avanço do agronegócio, o desmatamento e as queimadas (Correia *et al.*, 2024).

O crescimento do agronegócio, os altos índices de desmatamento e a recorrência de queimadas afetam diretamente a biodiversidade, os modos de vida das comunidades e o equilíbrio ecológico (Mataveli *et al.*, 2024). Um estudo de Marca e Alvim (2025) mostra que a expansão das áreas de pastagem e o cultivo de soja, impulsionados pela demanda global, têm provocado o desmatamento de extensas áreas de floresta primária, resultando em perda de biodiversidade e fragmentação de habitats.

Embora a literatura já tenha explorado a relação entre esses fatores e o desmatamento, ainda existem lacunas significativas na compreensão da dinâmica desse fenômeno complexo. Em primeiro lugar, a interação entre fatores econômicos, demográficos e de modernização agrícola, como a mecanização, tem sido pouco investigada, especialmente no contexto

amazônico. Em segundo lugar, falta uma análise dos efeitos diretos e indiretos desses fatores sobre o desmatamento, considerando as interdependências espaciais entre os municípios. Em terceiro lugar, é necessário compreender o papel específico da mecanização moderada (tratores de pneus) em contraste com a mecanização pesada (tratores de esteira). Enquanto a primeira pode contribuir para a preservação ambiental ao aumentar a produtividade em áreas já desmatadas, a segunda tende a estar mais associada ao desmatamento em larga escala. (2025, p. 2).

Nesse cenário, a resiliência territorial é um conceito central para compreender a capacidade de adaptação e reorganização diante de pressões externas. Esse entendimento é fundamental para orientar políticas públicas que promovam tecnologias sustentáveis e regulamentem o uso de maquinário pesado em áreas de alto valor ecológico (Rekow, 2019).

Em sistemas socioecológicos complexos, como as fronteiras agrícolas, a presença de não linearidades e retroalimentações torna necessária a realização de análises em múltiplas escalas (Levin *et al.*, 2012; Hamid *et al.*, 2023). Esse tipo de análise é essencial para compreender as interações entre diferentes níveis de organização, do local ao global, e os efeitos dessas relações sobre a dinâmica do sistema (Walpole *et al.*, 2013). Assim, este estudo busca aprofundar o entendimento dessas dinâmicas, aplicando técnicas preditivas que possam subsidiar políticas públicas e estratégias de governança ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

O recorte espacial corresponde à Zona de Convergência Socioecológica Cerrado–Amazônia (ZCS), abrangendo municípios situados nessa área de transição. A análise considera o período de 2000 a 2024, com projeções até 2035. As bases de dados utilizadas incluem o MapBiomas (uso e cobertura da terra), os sistemas PRODES, DETER e Queimadas do INPE, além de informações do IBGE e do IPEA referentes a indicadores socioeconômicos.

As ferramentas utilizadas incluem o Google Earth Engine (séries temporais), QGIS e PostGIS (armazenamento e análise espacial), R e Python (estatística e aprendizado de máquina), além do TerrSet/IDRISI e do NetLogo para simulações. As etapas analíticas abrangem o cálculo de métricas de paisagem (fragmentação e conectividade), a construção de índices de resiliência, a identificação de clusters de

vulnerabilidade (Moran, LISA), a classificação preditiva com algoritmos de aprendizado de máquina e a simulação de cenários futuros por meio de CA-Markov e modelos baseados em agentes (ABM).

RESULTADOS

Com a aplicação da metodologia proposta, a pesquisa mapeará tipologias de transição socioambiental capazes de identificar padrões de mudança no uso da terra na Zona de Convergência Socioecológica Cerrado–Amazônia (ZCS), além de construir um índice de resiliência territorial que integre dimensões ecológicas, sociais e econômicas.

Também se prevê o desenvolvimento de modelos preditivos para projetar tendências de desmatamento e fragmentação, a elaboração de cenários simulados até 2035 que permitam comparar diferentes trajetórias — como políticas de conservação em contraste com a expansão agropecuária — e a criação de uma plataforma interativa de apoio à decisão territorial, reunindo mapas, indicadores e simulações voltados a gestores públicos e à sociedade civil.

CONCLUSÃO

A modelagem integrada proposta representa um avanço metodológico para compreender e prever dinâmicas socioambientais na Zona de Convergência Socioecológica Cerrado–Amazônia (ZCS). A combinação de geoprocessamento, aprendizado de máquina e simulações multitemporais permite uma visão sistêmica e preditiva da resiliência territorial, apoiando estratégias de governança socioecológica.

Os resultados esperados podem subsidiar políticas públicas de ordenamento territorial e orientar ações de desenvolvimento sustentável, favorecendo a mitigação de conflitos e a preservação da biodiversidade na região de transição entre Cerrado e Amazônia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA pelo apoio institucional e pelas condições oferecidas ao desenvolvimento desta pesquisa, fundamentais para o fortalecimento da produção científica e da extensão acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORREIA, J. B.; SANTOS, A. B. C.; MARTINS, R. C.; NOGUEIRA, M. L.; ARAÚJO, R. V.; COSTA, R. B. Amazon Transition - Cerrado: Agricultural Frontier and Sustainability in The State of Mato Grosso, Brazil. **RGSA**, 2024, 18 (1), e06527. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-149>. Acesso em 15 set. 2025.

HAMID, A.; RAFIQ, D.; NAHVI, S. A.; BAZAZ, M. A. Hierarchical Deep Learning-Based Adaptive Time-Stepping Scheme for Multiscale Simulations. *arXiv*, 2023. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2311.05961>. Acesso em 10 set. 2025.

LEVIN, S.; XEPAPADEAS, T.; CRÉPIN, A.-S.; NORBERG, J.; DE ZEEUW, A.; FOLKE, C.; HUGHES, T.; ARROW, K.; BARRETT, S.; DAILY, G.; EHRlich, P.; KAUTSKY, N.; MÄLER, K.-G.; POLASKY, S.; TROELL, M.; VINCENT, J. R.; WALKER, B. Social-Ecological Systems as Complex Adaptive Systems: Modeling and Policy Implications. *Envir. Dev. Econ.* 2012, 18 (2), 111–132. <https://doi.org/10.1017/s1355770x12000460>. Acesso em 23 ago. 2025.

MARCA, L.; ALVIM, A. M. Deforestation in the Brazilian Amazon: An Analysis of Spatial Interactions between Economic and Demographic Factors. **Environ Dev Sustain**, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06211-6>. Acesso em 15 set. 2025.

MATAVELI, G.; JONES, M. W.; CARMENTA, R.; SANCHEZ, A.; DUTRA, D. J.; CHAVES, M.; DE OLIVEIRA, G.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. Deforestation Falls but Rise of Wildfires Continues Degrading Brazilian Amazon Forests. **Global Change Biology**, 2024, 30 (2). <https://doi.org/10.1111/gcb.17202>. Acesso em 02 ago. 2025.

REKOW, L. Socio-Ecological Implications of Soy in the Brazilian Cerrado. **CIS** 2019, 7 (1), 7–29. <https://doi.org/10.12924/cis2019.07010007>. Acesso em 15 set. 2025.

WALPOLE, J.; PAPIN, J. A.; PEIRCE, S. M. Multiscale Computational Models of Complex Biological Systems. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2013, 15 (1), 137–154. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071811-150104>. Acesso em 15 set. 2025.