

Maapeamento da suscetibilidade ao desmatamento associado à degradação por cicatriz de queimada na Amazônia Legal

Gustavo Fiedler Rossi

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos - SP – Brazil

gustavo.rossi@inpe.br

Resumo. A degradação florestal por fogo constitui um importante estágio intermediário no processo de conversão da floresta amazônica em áreas desmatadas. Compreender os fatores que influenciam essa transição é fundamental para o aprimoramento das ações de monitoramento e conservação. Neste estudo, foi analisada a conversão de áreas classificadas pelo sistema DETER como Cicatriz de Fogo em desmatamento identificado pelo PRODES durante o ano PRODES 2025 (01/08/2024 a 31/07/2025). Inicialmente, foram selecionadas apenas ocorrências de degradação localizadas em áreas previamente intactas, excluindo regiões já desmatadas ou degradadas em anos anteriores. A análise foi realizada em uma grade regular de 20 × 20 km cobrindo toda a Amazônia Legal. Foram avaliadas variáveis relacionadas à ocupação humana, infraestrutura e condições ambientais, utilizando Modelos Aditivos Generalizados (GAM) para estimar a suscetibilidade à conversão. Das 2.976 células que apresentaram ocorrência de degradação por fogo, 631 (21,2%) evoluíram para desmatamento. O modelo apresentou desempenho satisfatório, com AUC de 0,80 e AUC espacial de 0,79 obtida por validação cruzada espacial. As variáveis mais importantes foram o percentual de desmatamento recente, a distância a áreas urbanas e a distância a estradas, evidenciando a predominância de fatores antrópicos na conversão de áreas degradadas em desmatamento. Os resultados indicam que regiões próximas a infraestruturas de transporte e inseridas em contextos de expansão recente do desmatamento apresentam maior suscetibilidade à conversão, demonstrando o potencial do uso integrado dos sistemas DETER e PRODES para a identificação de áreas prioritárias para monitoramento e prevenção.

Palavras-chave: desmatamento; degradação florestal; Amazônia; DETER; PRODES; GAM; suscetibilidade.

1. Introdução

A Amazônia Legal Brasileira abrange a totalidade da bacia Amazônica em território nacional e porções do bioma Cerrado, totalizando aproximadamente 5 milhões de quilômetros quadrados, o que corresponde a cerca de 60% do território brasileiro. Apesar de sua relevância ecológica global, estima-se que aproximadamente 23% de sua cobertura florestal original já tenha sido desmatada, enquanto mais de 1 milhão de km² apresentam algum grau de degradação (HADDAD et al., 2024).

Esse cenário intensifica as preocupações quanto à aproximação de um possível ponto de não retorno (tipping point), no qual a floresta poderia sofrer alterações irre-

versíveis em sua estrutura e funcionamento, com potencial liberação de grandes quantidades de carbono para a atmosfera e consequente agravamento das mudanças climáticas [Gatti et al. 2021, Lovejoy and Nobre 2018].

Diante desse contexto, o monitoramento sistemático da cobertura florestal torna-se essencial para subsidiar políticas públicas e estratégias de conservação. No Brasil, destacam-se iniciativas como o Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES) e o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), ambos desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Enquanto o PRODES fornece estimativas anuais de desmatamento consolidado, o DETER atua na detecção em tempo quase-real de eventos de degradação e desmatamento, permitindo respostas mais rápidas ~~por parte dos~~ órgãos de fiscalização [Almeida et al. 2025].

No ano de 2025, o PRODES registrou aproximadamente 6.925,77 km² de desmatamento na Amazônia Legal, dos quais cerca de 2.397,85 km² foram classificados como “desmatamento por degradação progressiva”. Paralelamente, o DETER identificou aproximadamente 47.728,33 km² de áreas degradadas, sendo 45.342,96 km² associados especificamente à classe “degradação por cicatriz de fogo” (Figura 1). Esses valores evidenciam a magnitude dos processos de degradação florestal relacionados ao fogo na região.

A análise espacial entre os produtos indicou que aproximadamente 295,85 km² de áreas classificadas pelo DETER como degradação por cicatriz de fogo em 2025 apresentaram interseção com áreas posteriormente classificadas pelo PRODES como desmatamento por degradação progressiva. Esse resultado reforça a hipótese de que eventos iniciais de degradação associados ao fogo podem atuar como precursores do desmatamento consolidado, configurando uma trajetória gradual de conversão florestal.

Nesse contexto, compreender os fatores que influenciam a transição de áreas degradadas por fogo para desmatamento torna-se fundamental para o aprimoramento de estratégias de monitoramento e prevenção. A identificação de padrões espaciais e de variáveis associadas a esse processo pode contribuir para a construção de modelos preditivos capazes de indicar áreas com maior suscetibilidade ao desmatamento, mesmo após um único evento de degradação detectado. Assim, este estudo busca investigar a relação entre cicatrizes de fogo detectadas pelo DETER e sua evolução para desmatamento identificado pelo PRODES, com ênfase na identificação de regiões críticas e nos fatores ambientais e antrópicos que condicionam esse processo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Analisar os padrões espaciais e os fatores associados à conversão de áreas degradadas por cicatrizes de fogo em desmatamento na Amazônia Legal, a partir de dados dos sistemas PRODES e DETER, visando identificar regiões com maior suscetibilidade a esse processo.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar áreas classificadas como degradadas por cicatriz de fogo pelo DETER em 2024 que evoluíram (ou não) para desmatamento em 2025 segundo o PRODES;

- Caracterizar os padrões espaciais dessas áreas;
- Avaliar a relação entre variáveis ambientais e antrópicas e a ocorrência de desmatamento;
- Produzir um mapa de suscetibilidade à conversão de áreas degradadas por fogo em desmatamento

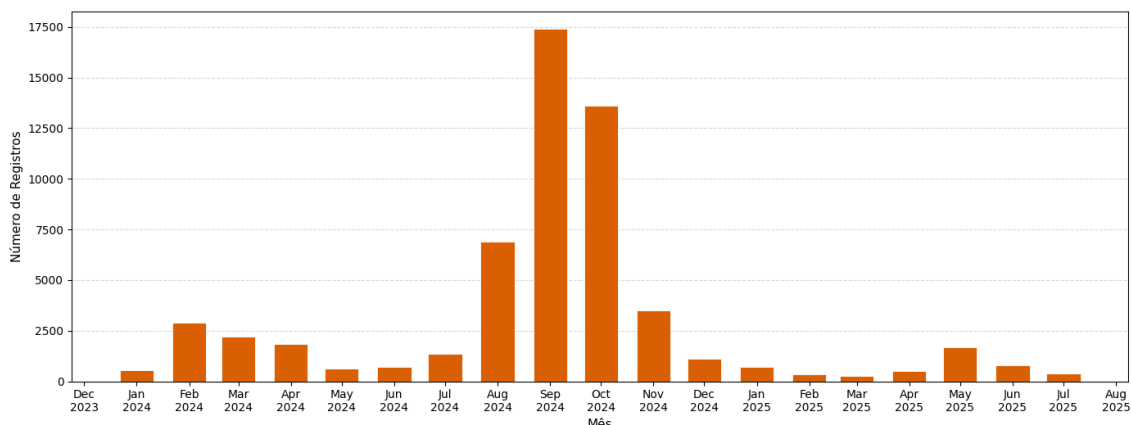


Figura 1. Histograma do número de ocorrências de incêndios por mês, de dezembro de 2023 a agosto de 2025. Nota-se um pico no número de ocorrências no segundo semestre de 2024.

3. Metodologia

3.1. Preparação dos dados

Os dados utilizados no estudo são oriundos dos projetos PRODES e DETER. Inicialmente, foi gerada uma máscara contendo todas as áreas previamente degradadas ou desmatadas até 31/07/2024.

Em seguida, foram filtradas as ocorrências de degradação do DETER referentes à classe Cicatriz de Fogo, bem como os polígonos do PRODES classificados como "desmatamento por degradação progressiva". Foram selecionados apenas os dados DETER que não interseccionavam a máscara de áreas previamente degradadas ou desmatadas, uma vez que o objetivo do estudo era analisar somente áreas anteriormente intactas desde 1987, início da série histórica do PRODES.

Com os dados PRODES e DETER das classes de interesse no mesmo período de estudo (01/08/2024 a 31/07/2025, correspondente ao ano PRODES 2025), tornou-se possível analisar se uma área que apresentou ocorrência de degradação ao longo do ano foi posteriormente desmatada até o fim do período. Para isso, foi realizada a interseção entre as camadas, em que áreas de sobreposição entre DETER e PRODES receberam valor "1" (degradação que evoluiu para desmatamento), enquanto áreas sem interseção receberam valor "0" (degradação que não evoluiu para desmatamento) (Figura 2).

Posteriormente, foram removidas ocorrências com área inferior a 6,25 hectares, com o objetivo de reduzir ruídos decorrentes de diferenças de escala e sobreposição imperfeita entre os projetos, mantendo compatibilidade com a escala de mapeamento do PRODES, mais grosseira que a do DETER, que detecta degradação a partir de 3 hectares na Amazônia.

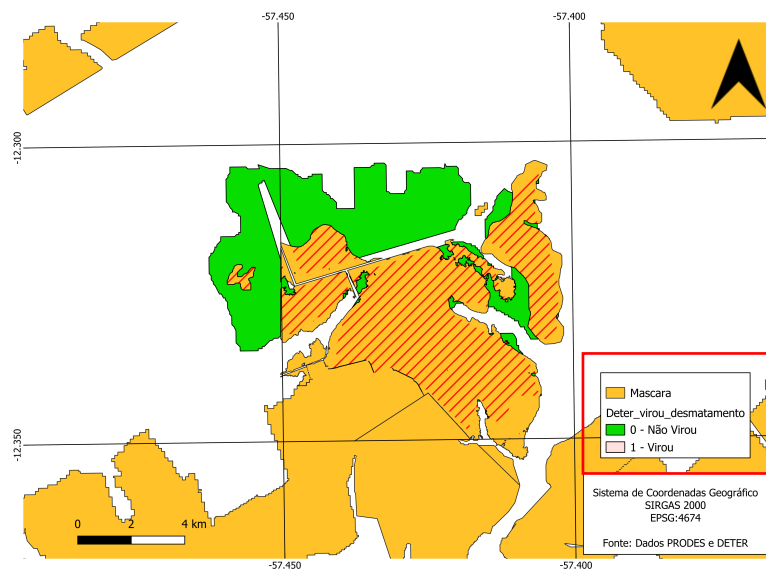


Figura 2. Ilustração da intersecção entre dados PRODES e DETÉR. Em verde, parte do polígono DETÉR que não evoluiu para desmatamento. Hachurado em vermelho, porção que evoluiu para desmatamento.

Essa informação (evoluiu ou não para desmatamento) será a variável principal nas etapas seguintes do estudo, permitindo identificar áreas com maior ou menor propensão à conversão de eventos de queimada em desmatamento no mesmo ano.

3.2. Grade Regular

A fim de compreender o processo de conversão de eventos de degradação associada a incêndios em desmatamento, foi gerada uma grade regular de 20 x 20 quilômetros (400 km²) para toda a extensão da Amazônia Legal, totalizando 13.092 células. Cada célula da grade corresponde à unidade amostral utilizada nas análises posteriores.

A partir dessa grade, todas as variáveis espaciais foram agregadas para o nível da célula. Para os dados em formato raster, foram extraídos valores médios dos pixels contidos em cada célula. Já para as variáveis vetoriais, foram calculadas métricas como a distância entre o centroide da célula e feições de interesse, além da porcentagem da área da célula ocupada por determinados polígonos. Mais detalhes sobre as variáveis utilizadas serão apresentados na Seção 4.3.

Por fim, a tabela resultante da extração e organização dessas variáveis foi utilizada como dado de entrada para o modelo GAM, permitindo estimar a suscetibilidade de cada célula ao desmatamento associado à degradação por incêndio e gerar os mapas finais.

3.3. Variáveis Preditoras

Para buscar compreender o processo de conversão de áreas queimadas em áreas desmatadas, foram reunidas variáveis relacionadas às características edafoclimáticas e antrópicas para cada célula. As variáveis, juntamente com a origem dos dados e sua resolução ou escala de origem estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis preditoras utilizadas no modelo.

Variável	Descrição	Fonte	Resolução/ Escala
pct_recent_defor	Percentual de desmatamento recente na célula (últimos 5 anos)	PRODES	1:250 000
road_dens	Densidade de estradas na célula	OpenStreetMap	Variável
dist_roads	Distância do centro da célula à estrada mais próxima	OpenStreetMap	Variável
dist_urban	Distância do centro da célula à área urbana mais próxima	IBGE	1:50 000
ppt_total	Precipitação total acumulada	CHIRPS	0,05°
lst_mean	Temperatura da superfície terrestre (média)	MODIS	1 km
HAND_mean	Altura acima da drenagem mais próxima (média)	SRTM, [Donchyts et al. 2016]	30 m

3.4. Modelagem

A modelagem da suscetibilidade à conversão de áreas degradadas por cicatriz de fogo em desmatamento foi realizada por meio de Modelos Aditivos Generalizados (Generalized Additive Models – GAM), utilizando o pacote mgcv no ambiente R. Os GAMs foram escolhidos por sua capacidade de representar relações não lineares entre as variáveis explicativas e a variável resposta sem a necessidade de definir previamente a forma funcional dessas relações.

Foram consideradas apenas as células da grade regular que apresentaram ocorrência de degradação classificada pelo DETER como Cicatriz de Fogo durante o ano PRODES 2025 (01/08/2024 a 31/07/2025), totalizando 2.976 células. A variável resposta foi binária, representando se a área degradada evoluiu para desmatamento segundo o PRODES (valor 1) ou não (valor 0). ~~Para minimizar possíveis inconsistências decorrentes de diferenças de escala entre os sistemas de monitoramento,~~ foram considerados como desmatamento apenas polígonos com área mínima de 6,25 hectares, correspondente à unidade mínima de mapeamento do PRODES.

Inicialmente foram avaliadas nove variáveis preditoras relacionadas a fatores antrópicos e ambientais: percentual de desmatamento recente, percentual de desmatamento nas células vizinhas, densidade de estradas, distância até estradas, distância até

áreas urbanas, precipitação acumulada, temperatura média da superfície terrestre (LST), HAND (Height Above Nearest Drainage) e declividade.

Antes do ajuste do modelo foi realizada análise de correlação entre as variáveis explicativas, seguida da avaliação de concurvidade por meio da função `concurvity()`, visando identificar possíveis dependências não lineares entre os preditores. Os resultados indicaram níveis moderados de concurvidade para algumas variáveis topográficas, mas sem valores suficientemente elevados para comprometer a interpretação do modelo.

O GAM foi ajustado utilizando distribuição binomial com função de ligação logit e estimativa dos parâmetros pelo método REML (Restricted Maximum Likelihood). Após a avaliação da significância estatística dos termos suavizados e da interpretabilidade ecológica das relações observadas, o modelo final foi composto pelas variáveis percentual de desmatamento recente, distância até estradas, distância até áreas urbanas e precipitação acumulada.

A adequação do modelo foi avaliada por meio dos diagnósticos fornecidos pela função `gam.check()`, que não indicaram problemas relacionados à dimensão das bases suavizadas nem evidências de subajuste. A capacidade preditiva foi avaliada por meio da curva ROC (Receiver Operating Characteristic) e da métrica AUC (Area Under the Curve).

Como os dados apresentam dependência espacial, foi realizada validação cruzada espacial utilizando o pacote `blockCV`. O alcance da autocorrelação espacial residual foi estimado a partir do semivariograma dos resíduos do modelo, resultando em aproximadamente 441 km. Esse valor foi utilizado para definir o tamanho dos blocos espaciais empregados na validação cruzada. Foram gerados cinco blocos hexagonais, distribuídos aleatoriamente sobre a área de estudo, sendo utilizados quatro blocos para treinamento e um para validação em cada iteração (Figura 3). O desempenho final do modelo foi obtido pela média das métricas calculadas em todos os blocos.

Após a validação, o modelo foi aplicado a todas as células da grade regular da Amazônia Legal, produzindo um mapa contínuo de suscetibilidade à conversão de áreas degradadas por fogo em desmatamento.

4. Resultados

4.1. Avaliação do Modelo

Das 2.976 células que apresentaram ocorrência de degradação por cicatriz de fogo durante o período analisado, 631 (21,2%) continham ocorrências que evoluíram para desmatamento segundo os registros do PRODES. Esse resultado indica que, embora a degradação por fogo possa representar uma etapa importante no processo de conversão florestal, a maior parte das áreas degradadas não foi convertida em desmatamento dentro do período analisado. Tal comportamento sugere que a ocorrência de fogo, isoladamente, não é suficiente para explicar a transição para o desmatamento, reforçando a influência de fatores ambientais e, principalmente, antrópicos nesse processo.

O modelo GAM apresentou capacidade satisfatória de discriminar áreas que evoluíram ou não para desmatamento. A AUC obtida na base completa foi de 0,80, enquanto a validação cruzada espacial resultou em AUC média de 0,79 (desvio-padrão de 0,01). A pequena diferença observada entre as duas métricas indica boa capacidade

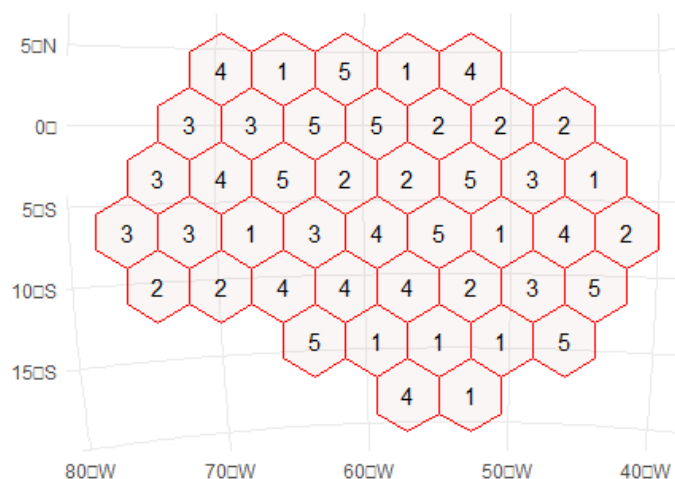


Figura 3. Partição das células da área de estudo em blocos espaciais para validação cruzada espacial, utilizando como referência o alcance da autocorrelação espacial estimado pelo semivariograma dos resíduos do modelo.

de generalização espacial do modelo e sugere que o desempenho não depende exclusivamente de autocorrelação espacial presente nos dados de treinamento.

A partir do limiar ótimo obtido pela curva ROC (0,243), foi construída a matriz de confusão. O modelo apresentou sensibilidade de 0,71, especificidade de 0,73 e acurácia balanceada de 0,72. Esses valores indicam desempenho equilibrado na identificação tanto das áreas que efetivamente evoluíram para desmatamento quanto daquelas que permaneceram apenas degradadas.

Entre as variáveis avaliadas, o percentual de desmatamento recente foi o fator mais importante do modelo ($p < 0,001$), apresentando elevada contribuição para explicar a ocorrência da conversão. Esse resultado sugere que áreas inseridas em regiões com histórico recente de desmatamento possuem maior probabilidade de serem incorporadas à dinâmica de expansão da fronteira antrópica. Esse padrão é consistente com diversos estudos sobre desmatamento na Amazônia, que apontam forte efeito de contágio espacial associado à expansão de áreas já convertidas [Laurance et al. 2002].

As variáveis distância até áreas urbanas ($p < 0,001$) e distância até estradas ($p < 0,05$) também apresentaram influência significativa. Em ambos os casos, observou-se maior suscetibilidade em regiões mais próximas da infraestrutura humana. A proximidade a estradas facilita o acesso, o transporte de insumos e a ocupação do território, enquanto a proximidade a centros urbanos está frequentemente associada à maior pressão por uso da terra e à disponibilidade de mão de obra e mercados consumidores.

A precipitação acumulada apresentou efeito marginal ($p = 0,12$), indicando possível influência secundária sobre a conversão de áreas degradadas em desmatamento. Por outro lado, variáveis relacionadas à topografia e condições biofísicas locais, como HAND, declividade e temperatura da superfície terrestre, não apresentaram efeitos estatisticamente significativos.

Esses resultados sugerem que a transição de áreas degradadas por fogo para desmatamento é predominantemente controlada por **fatores antrópicos, especialmente aqueles relacionados à ocupação territorial e à expansão da fronteira de uso da terra.** A ocorrência prévia de fogo pode representar apenas uma etapa intermediária de um processo de conversão já impulsionado por fatores socioeconômicos e de acessibilidade.

O mapa de suscetibilidade produzido pelo modelo (Figura 4) evidenciou **maiores probabilidades de conversão em regiões** historicamente associadas ao avanço do desmatamento, particularmente ao longo de grandes eixos rodoviários da Amazônia Legal. Destacam-se trechos da Rodovia Transamazônica e outras áreas próximas a centros urbanos e regiões com elevada concentração de desmatamento recente. Esses padrões reforçam a importância da infraestrutura de transporte e da dinâmica regional de ocupação como elementos centrais na compreensão da evolução das áreas degradadas por fogo.

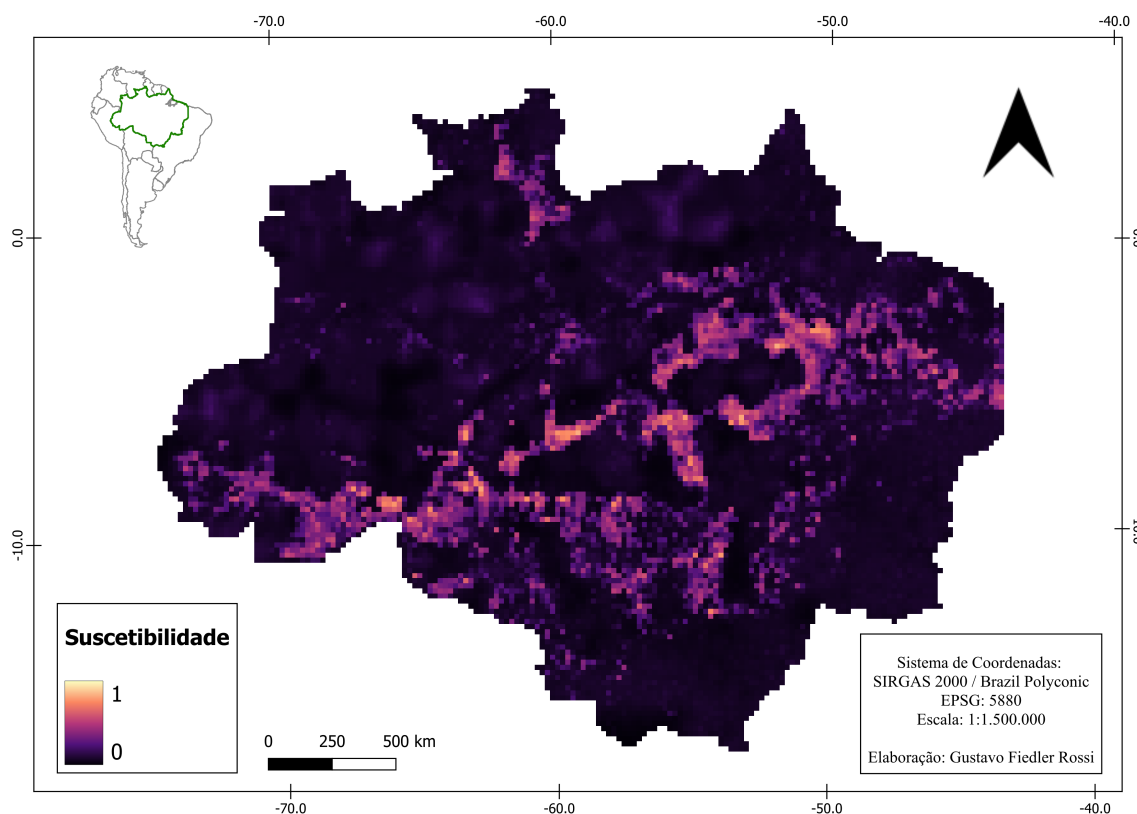


Figura 4. Mapa da suscetibilidade à conversão de cicatrizes de incêndio em desmatamento.

5. Limitações e Perspectivas

Embora o modelo tenha apresentado desempenho satisfatório, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

A primeira refere-se à utilização dos dados da Amazônia Legal como área de estudo. Embora essa abordagem seja compatível com os produtos PRODES e DETER, a utilização do recorte do Bioma Amazônia poderia proporcionar maior homogeneidade ambiental e reduzir a influência de áreas pertencentes a outros biomas presentes na Amazônia Legal, como o Cerrado.

Outra limitação está relacionada à análise temporal. O estudo considerou apenas um único ano PRODES, avaliando a conversão de áreas degradadas por fogo para desmatamento dentro do mesmo período de monitoramento. Entretanto, a transição entre degradação e desmatamento pode ocorrer ao longo de vários anos. Estudos futuros poderiam empregar séries temporais mais extensas para investigar trajetórias de conversão de longo prazo e identificar mudanças na importância das variáveis explicativas ao longo do tempo.

Também devem ser consideradas limitações associadas às variáveis utilizadas. Embora fatores ambientais e de acessibilidade tenham sido contemplados, não foram incluídas informações fundiárias, econômicas ou relacionadas à governança territorial. Variáveis como categoria fundiária, situação de regularização, valor da terra e indicadores socioeconômicos podem contribuir para explicar parte da variabilidade não capturada pelo modelo.

Do ponto de vista metodológico, a variável resposta utilizada no ajuste do modelo foi binária, representando a ocorrência ou não da conversão de áreas degradadas em desmatamento dentro de cada célula. Entretanto, o produto final do modelo consiste em uma superfície contínua de probabilidades, variando entre 0 e 1, que expressa a suscetibilidade de cada célula à conversão. Dessa forma, o modelo permite identificar gradientes de risco espacial, embora não considere explicitamente a proporção da área degradada que foi convertida em desmatamento dentro de cada célula. Estudos futuros poderiam explorar abordagens que incorporem a magnitude da conversão, possibilitando representar simultaneamente a probabilidade e a intensidade do processo.

Por fim, embora os GAMs ofereçam elevada interpretabilidade e sejam adequados para representar relações não lineares, outros algoritmos de aprendizado de máquina, como Random Forest, Gradient Boosting ou XGBoost, podem apresentar maior capacidade preditiva. Comparações entre diferentes métodos de modelagem constituem uma oportunidade promissora para aprimorar a previsão da conversão de áreas degradadas por fogo em desmatamento e apoiar estratégias de monitoramento e prevenção mais eficazes.

Referências

- Almeida, C. A. d., Perez, L. P., Reis, M. S., Camilotti, V. L., Messias, C. G., Monteiro, E. C. d. S., Pinheiro, T. F., Pinto, J. F. S. K. C., Soler, L. d. S., Vinhas, L., Maurano, L. E. P., Adami, M., Kuplich, T. M., Narvaes, I. d. S., Arcoverde, G. F. B., and Amaral, S. (2025). Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa BiomasBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass. *Cadernos de Astronomia*, 6(1):23–38.
- Donchyts, G., Winsemius, H., Schellekens, J., Erickson, T., Gao, H., Savenije, H., and van de Giesen, N. (2016). Global 30m Height Above the Nearest Drainage.
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., and Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867):388–393.

- Laurance, W. F., Albernaz, A. K. M., Schroth, G., Fearnside, P. M., Bergen, S., Venticinque, E. M., and Da Costa, C. (2002). Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography*, 29(5-6):737–748. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-2699.2002.00721.x>.
- Lovejoy, T. E. and Nobre, C. (2018). Amazon Tipping Point. *Science Advances*, 4(2):eaat2340.