



Mineração de Dados Como Técnica para Análise de Crimes Ambientais Autuados pelo IBAMA no período de 2000 a 2024

Alexandre Antônio Caus Dalabona

(UTFPR/ dalabona@alunos.utfpr.edu.br)

Bruno Samways dos Santos

(UEM)

Marco Antônio Ferreira

(UTFPR)

RESUMO:

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) usa autos de infração para registrar e responsabilizar condutas lesivas ao meio ambiente. Entre 2000 e 2024 mais de 500 mil autos foram lavrados, abrangendo diferentes biomas, tipos de infração e contextos territoriais. O presente estudo utilizou a técnica de mineração de dados para analisar esses autos de infração e verificar padrões. Resultados evidenciaram que contextos ecológicos, regionais, socioeconômicos e culturais moldam os padrões de infrações ambientais, reforçando a necessidade de estratégias integradas de fiscalização, monitoramento, educação ambiental e políticas públicas adaptadas a cada bioma. Conclui-se que a mineração de dados é uma importante ferramenta para analisar grandes bancos de dados, o que contribui para aprimorar a atuação do IBAMA e demais órgãos ambientais no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Exploratória de Dados, infrações ambientais, padrões espaciais.

Realização:

1. Introdução

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) é uma autarquia criada pela Lei 7.738/1989, reunindo quatro órgãos: Secretaria Especial de Meio Ambiente (Sema) do Ministério do Interior, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), Superintendência do Desenvolvimento da Pesca (Sudepe) e Superintendência da Borracha (Sudhevea). Dentre suas atribuições destacam-se o exercício do poder de polícia ambiental; a execução de atribuições federais na Política Nacional do Meio Ambiente referentes ao licenciamento ambiental, ao controle da qualidade ambiental, à autorização de uso dos recursos naturais e à fiscalização, monitoramento e controle ambiental; e a execução de ações supletivas de competência do governo federal, o que ocorre sobretudo na fiscalização ambiental e com foco especial na Amazônia Legal (SCHMITT, 2015).

A fiscalização ambiental constitui o principal instrumento empregado pelo poder público para prevenir e reprimir crimes ambientais. Nesse contexto, o IBAMA destaca-se como um dos órgãos federais centrais na execução das ações fiscalizatórias, especialmente no combate ao desmatamento na Amazônia (SCHMITT, 2015). No âmbito da fiscalização ambiental federal, o auto de infração constitui o documento administrativo por meio do qual o IBAMA formaliza a constatação de um crime que viola a legislação ambiental. É um ato jurídico unilateral, lavrado pelo agente ambiental no momento da fiscalização, que descreve a infração observada, identifica o responsável, indica o enquadramento legal e estabelece as penalidades previstas, como multa, embargo ou apreensão de bens. Dentre os tipos de infração definidos pela Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998) e pelo Decreto nº 6.514/2008 estão as infrações contra a fauna, contra a flora, relativas à poluição ambiental, à atividade pesqueira, às infrações administrativas, ao licenciamento ambiental, entre outras. O auto de infração é o instrumento inicial para a abertura do processo administrativo ambiental, permitindo ao autuado exercer o contraditório e a ampla defesa. Sua emissão é central para a política de responsabilização ambiental, e constitui um dos principais mecanismos de combate aos ilícitos ambientais (SCHMITT, 2015; BRASIL, 1998; BRASIL, 2008).

Os dados dos autos de infração lavrados estão disponibilizados, em sua integralidade, no portal de dados abertos do IBAMA. No período de 2000 a 2024, recorte temporal utilizado para este estudo, foram lavrados mais de 500 mil autos de infração ambiental. As informações disponibilizadas incluem o número ou código existente no formulário que compõe a identificação do Auto de infração, o valor de multa indicado inicialmente pelo agente ambiental, a descrição do fato infracional, a data e horário da lavratura do formulário, o nome do município e sigla da unidade da federação de ocorrência da infração, tipo de infração e a descrição do bioma afetado pela infração (IBAMA, 2024).

Considerando a quantidade expressiva de dados disponibilizados dos autos de infração ambiental lavrados pelo IBAMA, a aplicação de Mineração de Dados pode possibilitar a identificação e o entendimento das características mais relevantes dos diversos tipos de crimes ambientais. Compreender tais características e identificar os principais biomas e estados onde ocorrem pode auxiliar na elaboração de estratégias mais efetivas no combate ao cometimento dos mesmos.

Diante desse panorama, o presente estudo teve como objetivo analisar os autos de infração lavrados pelo IBAMA entre 2000 e 2024, com o intuito de identificar padrões, similaridades e características relevantes associadas às diferentes modalidades de infrações ambientais nos diferentes biomas e regiões.

2. Fundamentação Teórica

A crise ambiental que o planeta enfrenta emergiu como um dos desafios mais significativos da humanidade. Com o aumento da população e da atividade econômica, a pressão sobre os ecossistemas e recursos naturais se intensifica e mais emissões poluentes são geradas. Nesse contexto, o crime ambiental representa uma ameaça crítica à proteção ambiental e à sustentabilidade do planeta (QUESADA-RUIZ, 2025). Rabaïotti (2017) define “crime ambiental” como a atividade ilegal que prejudica o meio ambiente. Em seu relatório de 2021 a Comissão Europeia afirma que o crime ambiental se espalhou globalmente nos últimos anos, causando danos significativos e representando um risco considerável para o meio ambiente e para a saúde humana, além de ser cada vez mais reconhecido como crime organizado transnacional (DAVIES, 2025). Nos últimos anos a disseminação mista da globalização e das redes digitais criou oportunidades para o crime organizado. Além de suas atividades criminosas tradicionais, essas organizações começaram a cometer crimes ambientais para obter lucros extras (BARONE, 2025). Nellemann et al. (2016), em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, identificam cinco categorias principais de crimes ambientais: desmatamento e extração ilegal de madeira, pesca não regulamentada, mineração ilegal, comércio e descarte ilegais de resíduos perigosos e comércio ilegal de animais selvagens. Globalmente, os crimes ambientais representam uma grande ameaça à biodiversidade e ao sustento das populações locais (FRANCO, 2025). Suas causas profundas são, ideologicamente, a ênfase nos interesses humanos como prioridade, reduzindo a natureza a uma ferramenta de recursos a serviço do crescimento econômico (HAYWARD, 1997). Para Su (2026), o crime ambiental representa a ameaça mais significativa ao meio ambiente e à civilização ecológica. Consequentemente, o combate ao crime ambiental constitui um elemento indispensável e crucial do sistema de governança ecológica e ambiental, o que exige estratégias de prevenção mais eficazes (QUESADA-RUIZ, 2025).

Dentre as categorias principais de crimes ambientais, o desmatamento tropical continua sendo um dos desafios socioecológicos mais urgentes, apesar de décadas de esforços internacionais para regulamentar o uso das florestas (MURADIAN, 2025). E o risco de desmatamento está intimamente ligado ao consumo de países ricos, enquanto os custos ambientais recaem principalmente sobre produtores de baixa renda, ricos em biodiversidade (FANG et al., 2021). Estudos que citam o desmatamento como um problema local podem ser encontrados, na Costa Rica (RODRIGUEZ-BONILLA, 2026, FURUMO, 2021), Indonésia (TACCONI, 2019), e em nível continental, na Pan-Eurásia (LI, 2025). Fang e outros (2021) mapearam as pegadas ecológicas dos países que compõem a Iniciativa Cinturão e Rota da China para comércio internacional. Li (2025) ainda destaca que as mudanças climáticas amplificam a insegurança ecológica em países de baixa renda por meio da alteração das precipitações, do aumento das temperaturas e de eventos extremos mais frequentes que reduzem a

produtividade da terra. Para Rodriguez-Bonilla (2026), o desmatamento e a agricultura intensiva ameaçam a saúde do solo e os ecossistemas associados. E o desmatamento ilegal é realizado à medida que a vantagem econômica obtida é maior que os riscos de punição (SCHMITT, 2015). As intervenções de conservação têm tido sucesso limitado na mitigação do desmatamento e da degradação dos ecossistemas (VON ESSEN, 2021).

Apesar do desmatamento na floresta Amazônica ter se iniciado em 1970, com uma aceleração nas últimas décadas, algumas soluções políticas conseguiram reduzi-lo (FERREIRA, 2025, NUNES, 2024). Borner (2015) afirma que a perda anual de floresta na Amazônia brasileira havia diminuído de 27.000 km² em 2004 para menos de 5.000 km² em 2012. Esta redução se deve à implementação do DETER, um sistema que processa imagens de satélite e emite alertas de desmatamento (ASSUNÇÃO, 2023). Crepin (2024) cita uma redução de 36% a 41% no desmatamento após a intensificação da fiscalização em municípios prioritários em relação a municípios de controle. Além de fornecer evidências de que a lista de prioridades do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) foi eficaz na redução do desmatamento sem prejudicar o setor da soja.

Nunes (2024) pontua que na primeira fase do PPCDAm (2004–2008), houve um aumento de 36% na aplicação de multas ambientais, com uma redução da taxa anual de desmatamento de 18%, em relação ao período anterior (2000 a 2003). Apesar da queda de 25% na aplicação de multas ambientais no PPCDAm-II (2009–2011), houve uma compensação com uma maior eficiência operacional. Uma fiscalização mais rigorosa e eficiente resultou em uma reação contrária às políticas ambientais. Sobrecarregados por sanções ambientais, os grupos de interesse rural pressionaram o Governo, com sucesso, por uma reforma do Código Florestal Brasileiro, base legal para as ações de fiscalização, em 2012, juntamente com a anistia para 58% de todo o desmatamento ilegal antes de 2008. Com o PPCDAm-III (2012–2015) e PPCDAm IV (2016–2020), os órgãos ambientais tentaram neutralizar a crescente pressão do desmatamento. Entre 2012 e 2018, foram emitidos 24 mil embargos e aplicadas 32,3 mil multas, no valor de USD 3,8 bilhões, abrangendo 1,9 milhão de hectares. Isso equivale a aproximadamente 4 a 5 mil notificações de infração por ano. Em 2019, o papel de liderança do IBAMA e ICMBio na fiscalização ambiental foi transferido para as Forças Armadas Brasileiras. Apesar do uso massivo de recursos pelos militares, não houve redução significativa nas taxas de desmatamento e nos incêndios florestais.

Ungar (2017) cita que o Brasil foi pioneiro em muitas estratégias que utilizam informações e diretrizes federais para aprimorar a investigação de crimes ambientais. A estratégia de monitoramento e aplicação da lei para o combate ao desmatamento na Amazônia se mostrou eficaz. A experiência do Brasil com o monitoramento por satélite de florestas tropicais serve como um exemplo encorajador de como a inovação pode aprimorar as políticas públicas (ASSUNÇÃO, 2023).

Além da análise e monitoramento via satélite, a mineração e a análise exploratória de dados são ferramentas eficazes para a análise de fatores que impactam o desmatamento e o cometimento de crimes ambientais, como análise de queimadas e incêndios florestais (LIU, 2024; MOWLA, 2024; SENGUPTA, 2025; TEKE, 2025), análise de espécies invasoras (PEDRO, 2024) e o acompanhamento da cadeia de transporte de produtos florestais (LUEMBA, 2021).

Dias (2024) fornece uma análise abrangente da dinâmica do desmatamento na Amazônia brasileira usando técnicas de aprendizado de máquina a partir de plataformas do governo federal brasileiro, como Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto de Pesquisa e Econômica Aplicada (IPEA) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cavagnari (2024) cita o Portal de Dados de Abertos de autos de infração do IBAMA, disponibilizado através do Plano de Dados Abertos do Governo Federal, como fonte de evidências de ocorrências ambientais no Brasil

3. Método de Pesquisa

Os dados dos autos de infração lavrados estão disponibilizados, em sua integralidade, no Portal de Dados Abertos (IBAMA, 2024), em formato csv (Comma-Separated Values). Isso significa que os valores são separados por vírgula. É um formato para armazenamento de dados tabulares em texto. Cada linha do arquivo representa uma linha na tabela e as colunas são separadas por vírgula. Para cada ano existe um arquivo do tipo csv com os autos de infração lavrados pelo IBAMA. No período de 2000 a 2024, recorte temporal utilizado para este estudo, foram lavrados mais de 500 mil autos de infração ambiental. Neste contexto, a utilização de técnicas de Análise Exploratória de Dados pode ser uma estratégia promissora para a compreensão e solução de desafios socioambientais relacionados à diversos temas (LUEMBA, 2021).

Através do *JupyterLab*, plataforma baseada em navegador, da distribuição Anaconda, os arquivos do tipo csv foram consolidados em um único banco de dados. Rahm e Do (2000) definem a limpeza de dados, a fim de detectar e remover anomalias dos dados com o objetivo de melhorar sua qualidade, como o primeira tarefa a ser desenvolvida. Nesta etapa, em virtude de vários dados faltantes nas colunas de interesse, foi necessário realizar o tratamento dos dados. Para o preenchimento da coluna referente ao bioma atingido o banco de dados foi mesclado com o banco de dados disponibilizado pelo IBGE com a informação do bioma predominante por município. A biblioteca *Natural Language Toolkit* (NLTK) do Python, para localização de palavras mais frequentes, foi utilizada para o preenchimento dos dados faltantes na categoria “tipo de infração”. As palavras características da descrição de um tipo de infração, como, por exemplo, “desmatar”, “madeira” e “queimada” para infrações do tipo flora, “cativeiro”, “silvestre”, e “animais” para infrações do tipo fauna, e “pesca”, “defeso” e “embarcação” para infrações do tipo pesca, foram utilizadas para a substituição do tipo de infração mais adequado. Quando não foi possível o preenchimento, os dados foram descartados.

Em decorrência da forma de transformação de dados adotada, parte dos autos de infração lavrados a partir de outubro de 2019 é exibido mais de uma vez, quando associado a mais de um polígono de autuação ou demais atributos, o que pode ter como consequência uma contagem superestimada na quantidade de autos de infração nesse período (IBAMA, 2026). Em virtude disto, foi utilizado o número ou código do auto de infração para identificar e excluir ocorrências em duplicidade.

A fim de permitir uma análise regional das infrações ambientais, as unidades da federação foram agrupadas por região. Em virtude desta informação não constar no banco de

dados de autos de infração foi criada uma nova coluna, onde foi informada a região à qual pertencia o estado informado.

A etapa da análise exploratória dos dados propriamente dita foi utilizada para descobrir novos padrões, como a sazonalidade de alguns eventos (LEME, 2020), especialmente para o bioma Amazônia. Para isso foram geradas tabelas de frequência, tabelas cruzadas e gráficos de barra e linha, com a utilização das bibliotecas *Pandas*, *Numpy* (*Numerical Python*), *Matplotlib*, pacote para plotagem gráfica no Python, e *Seaborn*. Os resultados apresentados pelas tabelas e gráficos foram comparadas com a literatura científica.

4. Análise dos Resultados

O banco de dado consolidado, compreendendo o período de 2000 a 2024, possui 84 colunas e 516.622 registros referentes a autos de infração ambiental. As informações apresentadas incluem, por exemplo, o número do auto, tipo de infração, fundamentação legal, descrição, valor do auto de infração, data e hora da lavratura, entre outras. Neste trabalho as colunas de interesse são o número ou código existente no formulário que compõe a identificação do Auto de infração, o valor da multa indicado inicialmente pelo agente ambiental, a descrição do fato infracional, a data e horário da lavratura do formulário, o nome do município e sigla da unidade da federação de ocorrência da infração, classificação da infração a partir do código do tipo (“administração ambiental”, “cadastro técnico federal”, “controle ambiental”, “fauna”, “flora”, “qualidade ambiental”, “ordenamento urbano e contra o patrimônio cultural”, “organismos geneticamente modificados e biopirataria”, “pesca”, “unidade de conservação”, “licenciamento”, “outras”) e a descrição do bioma afetado pela infração (IBAMA, 2024).

A variável com a descrição do bioma atingido apresentava, inicialmente, 240.217 valores não nulos, e continha inconsistências significativas, incluindo a atribuição de biomas distintos a um mesmo auto de infração, como ocorrências simultâneas de Amazônia e Pampa, ou, ainda, indicação do bioma Pantanal fora dos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Para sanar essas inconsistências, realizou-se a junção com a base de dados do IBGE que disponibiliza o bioma predominante por município.

Além disso, verificou-se a necessidade de padronização da variável tipo de infração, que continha registros preenchidos incorretamente ou em branco. No banco de dados original esta variável apresentava 141.853 registros onde o tipo de infração não era informado. Para essa etapa, empregou-se a biblioteca NLTK, que permitiu aplicar técnicas de processamento de linguagem natural, incluindo normalização textual e remoção de ruído. Como resultado, o número de registros sem o tipo de infração caiu para 34.236.

Após estes tratamentos, o banco de dados passou a apresentar 498.829 valores não nulos, nas 11 categorias selecionadas para a análise, contendo informações sobre o número ou código do auto de infração, o valor original definido pelo agente autuante, município, estado, região, tipo de infração, bioma atingido, ano e o mês. Na Figura 1 é mostrada a frequência de ocorrências por tipo de infração por bioma.

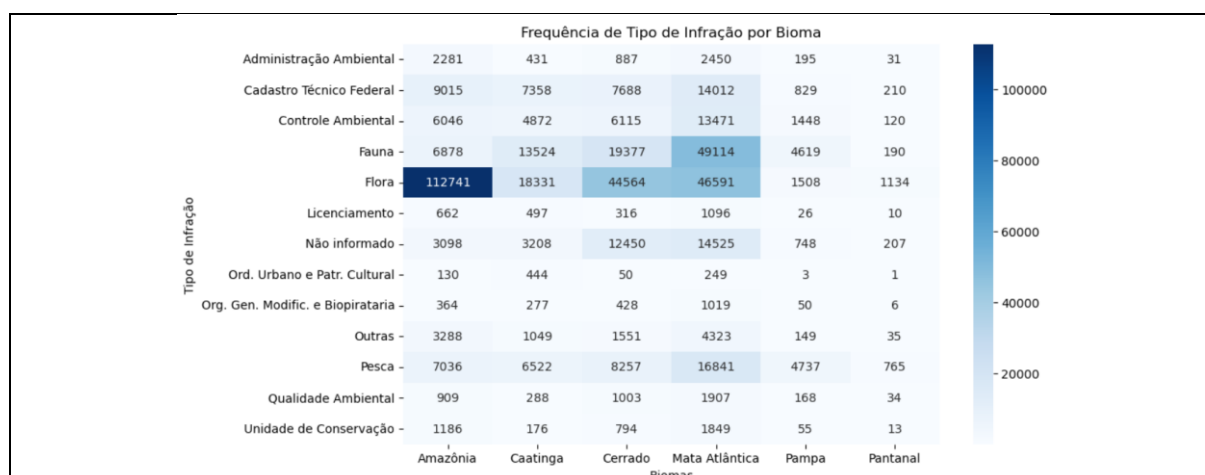


Figura 1 – Informações sobre o banco de dados consolidado com frequência dos tipos de infração por Bioma.

Fonte: autoria própria.

A fim de identificar as frequência de autos de infração nos estados e em cada região foram geradas tabelas de frequência (Figura 2), através da biblioteca *Seaborn*.



Figura 2 – Frequência dos tipos de autos de infração por: A) estado; B) região

Fonte: autoria própria.

Na Figura 2A verifica-se que o tipo mais frequente de infração ambiental nos estados é o tipo flora. As exceções ocorrem no Distrito Federal e nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, onde a maior incidência é de autos de infração do tipo fauna. No Estado do Rio Grande do Norte os autos de infração do tipo flora e fauna possuem a mesma frequência.

Ao se analisar a frequência dos tipos de infração nas regiões (Figura 2B), verifica-se que infrações de flora são as mais frequentes em quatro deles: Norte (71%), Centro-Oeste (57%), Nordeste (49%) e Sul (34%). No Nordeste, o segundo tipo mais frequente de infração foi fauna (18%). No Sudeste autos de infração do tipo fauna são mais frequentes (40%), e os do tipo flora ficaram em segundo lugar 21%).

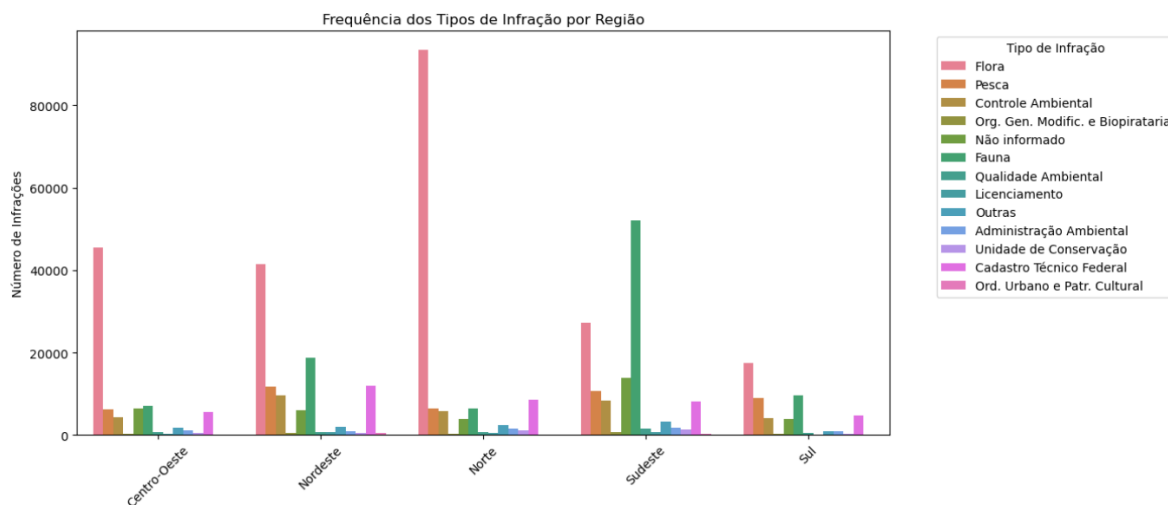


Figura 3: Frequência dos tipos de infração por região.

Fonte: autoria própria.

A figura 3 apresenta um gráfico de barras mostrando a frequência dos tipos de autos de infração por região. Verifica-se que ao longo do período de estudo foram aplicados quase 100.000 autos de infração do tipo flora na região Norte. Todas as regiões apresentam autos de infração do tipo flora como o mais frequente, à exceção da região Sudeste, onde o mais frequente foram autos de infração do tipo fauna. Na região Norte a frequência dos autos de infração do tipo flora é mais de 10 vezes maior do que o segundo tipo. A região Sul é a que apresenta a menor frequência de lavratura de autos de infração, apesar de apresentar pontos críticos de desmatamento do bioma Mata Atlântica (Molinez, 2024). Constata-se também, que apesar da limpeza dos dados realizada, auto de infração sem a informação do tipo de infração são o 3º tipo mais frequente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste.

A seguir é apresentada uma análise dos 5 tipos mais frequentes de autos de infração lavrados nos estados, separados por região.

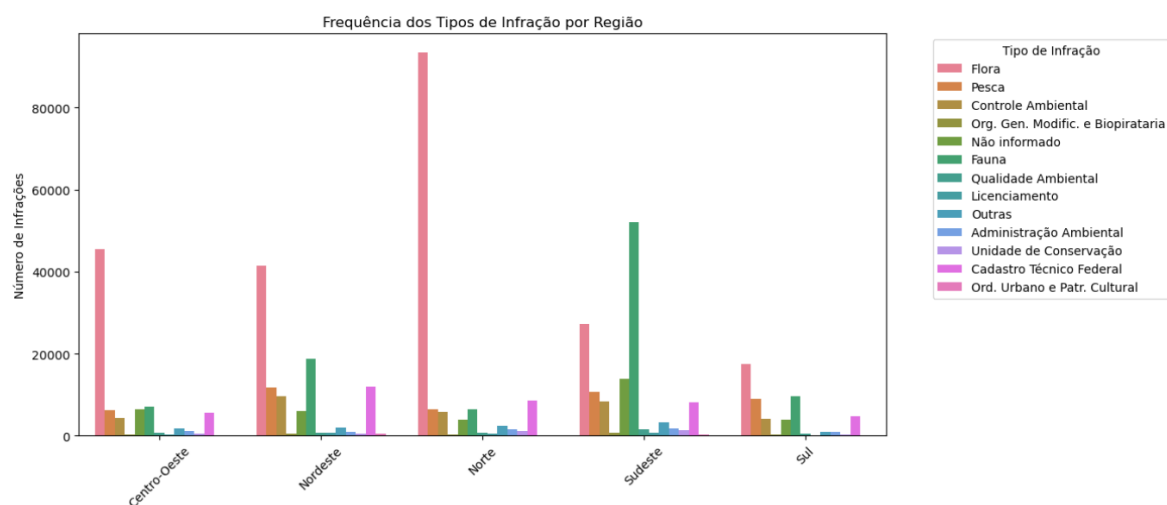


Figura 4: Frequência dos tipos de infração por região.
Fonte: autoria própria.

Na Figura 4 são mostrados os tipos mais frequentes de autos de infração nos estados da região Centro-Oeste. Verifica-se que o tipo de auto de infração mais frequente nos 3 estados, à exceção do Distrito Federal, é o tipo flora, com destaque para o estado do Mato Grosso, com o maior número, onde ocorre o ecótono dos biomas Cerrado e Amazônia. Esses resultados são consistentes com evidências acadêmicas sobre desmatamento ilegal e lacunas na governança ambiental no estado. Carvalho e colaboradores (2024) investigaram o cumprimento do Código Florestal em fazendas de soja e mostraram que, entre agosto de 2009 e julho de 2019, metade do desmatamento promovido em propriedades registradas ocorreu sem licença ambiental, sugerindo que muitas infrações de flora do cluster estão associadas à expansão agropecuária não autorizada. De forma complementar, Gollnow & Lakes (2018) demonstram que tanto o desmatamento direto quanto indireto ligados à soja contribuíram significativamente para a perda de vegetação nativa em propriedades rurais, reforçando a relação entre práticas agrícolas e infrações ambientais.

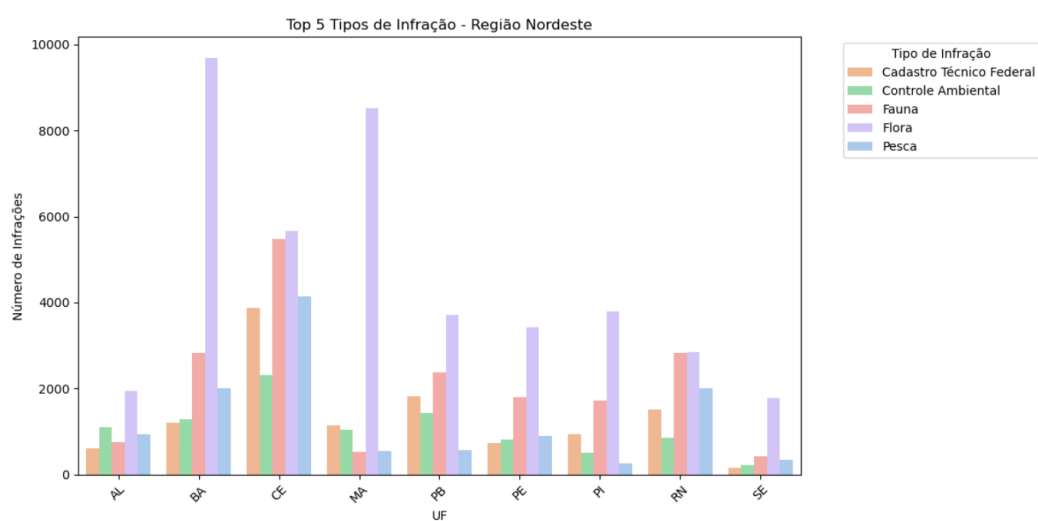


Figura 5: Frequência dos tipos de infração nos estados da região Nordeste.
Fonte: autoria própria.

Nos estados da região Nordeste, onde o bioma Caatinga possui 97% de sua área (IBGE, 2004) infrações do tipo flora são as mais frequentes em todos os estados (Figura 5). Estes dados apontam para os usos predatórios da vegetação nativa neste bioma, especialmente para extração de lenha e produção de carvão vegetal. Araújo e Cavalcante (2024) analisaram a cadeia produtiva da lenha e do carvão no município de Várzea (PB) e mostraram que a extração vegetal insustentável é uma das principais formas de degradação da Caatinga. Além disso, Medeiros (2017) revela que aproximadamente 80% desses produtos têm origem no desmatamento na região Nordeste, demonstrando a forte pressão de uso para fins energéticos. Costa e colaboradores (2024) desenvolveram um sistema de alerta de desmatamento especificamente para esse bioma, evidenciando que a perda de cobertura vegetal continua relevante.

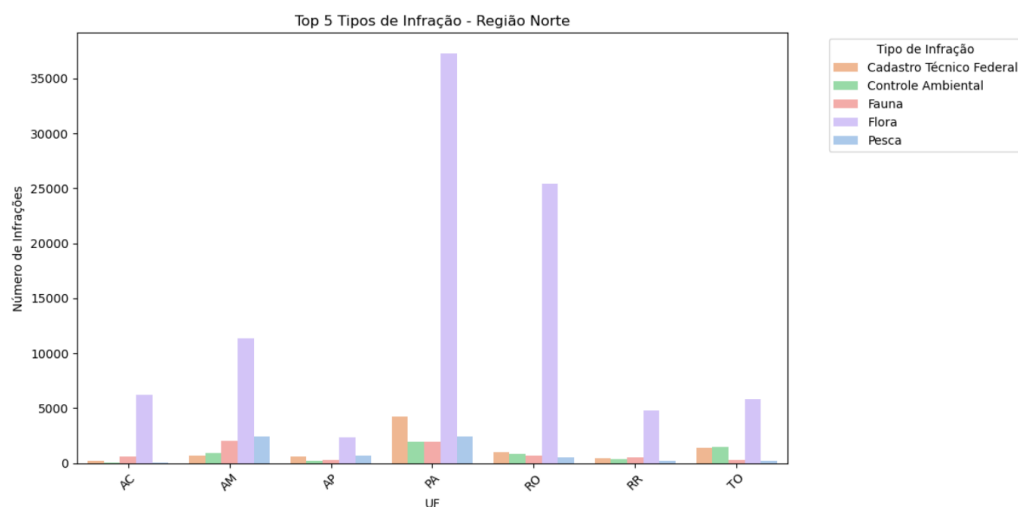


Figura 6: Frequência dos tipos de infração nos estados da região Norte.

Fonte: autoria própria.

Em todos os estados da região Norte os autos de infração do tipo flora são os mais frequência, superando em muito os demais (Figura 6). O destaque é o para o estado do Pará, com o maior número de autos de infração da região. Esse padrão é consistente com dados apresentados na literatura, já que aponta a Amazônia como um dos principais *hotspots* de crimes ambientais ligados à exploração ilegal de madeira, desmatamento e atividades agrícolas não autorizadas (FEARNSIDE, 2005; SOARES-FILHO et al., 2006). Estes dados estão alinhados com estudos prévios sobre fiscalização ambiental e desmatamento ilegal, que indicam o Pará e Rondônia como líderes em autuações de flora na Amazônia, devido à combinação de intensa atividade madeireira, expansão agrícola e acesso facilitado por rodovias que atravessam áreas de floresta (FEARNSIDE, 2016).

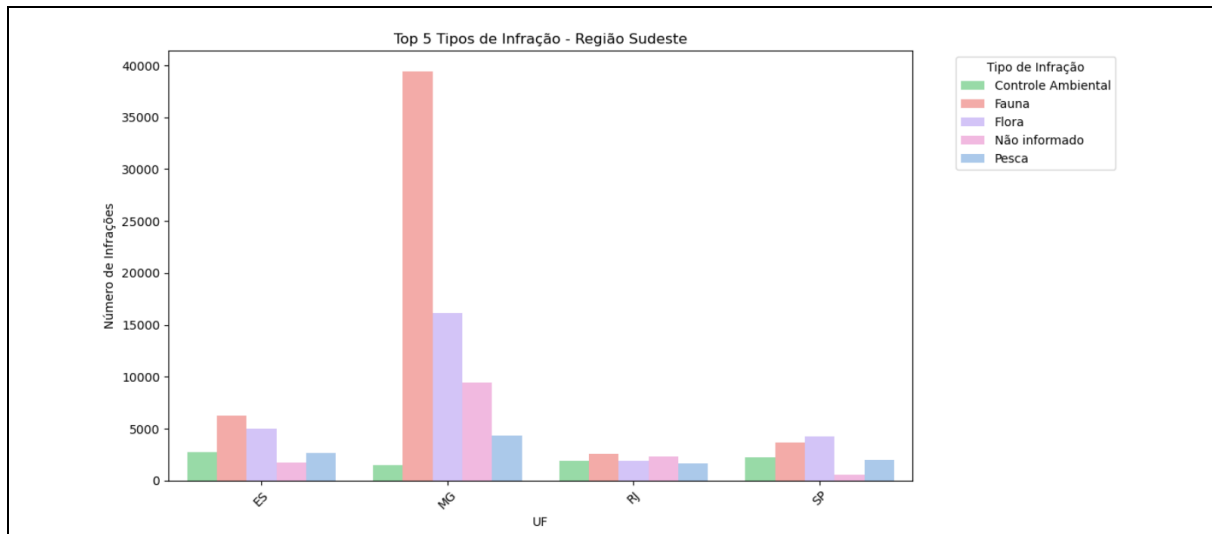


Figura 7: Frequência dos tipos de infração nos estados da região Sudeste.

Fonte: autoria própria.

A região Sudeste destaca-se por apresentar autos de infração do tipo fauna como o mais frequente nos estados, com destaque para o estado de Minas Gerais, à exceção de São Paulo, onde o tipo flora é pouco maior (Figura 7). Esse resultado é coerente com a literatura, uma vez que Minas Gerais figura entre os principais estados associados ao tráfico de animais silvestres, especialmente de avifauna (Carmo 2020). O comércio ilegal de fauna configura a terceira maior atividade ilícita do mundo, atrás apenas dos tráficos de drogas e armas; no contexto brasileiro, ocupa a segunda posição entre os crimes ambientais mais lucrativos (VASCONCELOS, 2023). Neste contexto Minas Gerais ocupa uma posição estratégica nas rotas do tráfico de fauna. O estado possui uma extensa malha rodoviária, conectando regiões de captura, como a Zona da Mata e áreas interioranas, a grandes centros consumidores, como São Paulo e Rio de Janeiro, facilitando o transporte rápido e discreto de animais silvestres (OLIVEIRA, 2025).

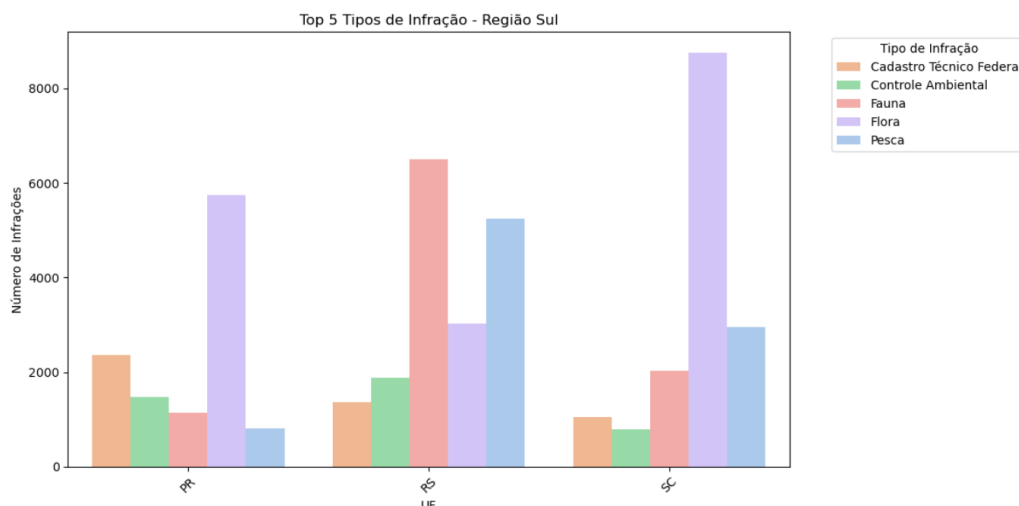


Figura 8: Frequência dos tipos de infração nos estados da região Sul.

Fonte: autoria própria.

Na região Sul os estados do Paraná e Santa Catarina apresentam autos de infração do tipo flora como os mais frequentes, enquanto o Rio Grande do Sul apresenta os autos de infração do tipo fauna (Figura 8). Jerozolinski (2026) cita que no sul da Mata Atlântica brasileira, a expansão agropecuária fragmentou a Floresta Subtropical Mista e os Campos de Altitude, ecossistemas que historicamente receberam pouca proteção formal. Isso é corroborado pelos dados, visto que o estado do Sul com maior número de infrações de flora é Santa Catarina, e a quantidade é inferior à 9.000 autos durante o período de estudo. A exploração madeireira, o desmatamento e as mudanças no uso da terra são perturbações críticas em *hotspots*, locais de alta biodiversidade e severamente ameaçadas pelas atividades humanas, como a Mata Atlântica no Brasil (Laurance 2009). A Mata Atlântica também é o segundo bioma brasileiro mais desmatado proporcionalmente à sua área original de vegetação natural (MOLINEZ, 2024). E um dos domínios do bioma Mata Atlântica, presente exclusivamente ao sul do Trópico de Capricórnio, é o Domínio da Floresta Subtropical Mista, também conhecida como Mata das Araucárias (IBGE, 2025). Esta formação florestal é, também, considerada como um dos ecossistemas mais sensíveis às mudanças climáticas (FRITZSON; WREGGE; MANTOVANI, 2018), sendo ainda a *Araucária angustifolia*, árvore que dá nome à formação, uma espécie que figura na categoria de criticamente em perigo em nível global (WREGGE et al., 2017). Apesar disso tudo, o bioma Mata Atlântica recebe menos da metade da atenção do poder público federal no combate ao seu desmatamento em relação ao bioma Amazônia (Figura 1). E a região que possui a formação florestal com a espécie mais criticamente ameaçada é a mais negligenciada (Figura 4).

5. Conclusões

A mineração de dados, método proposto para consolidação, tratamento e análise do banco de dados de autos de infração do IBAMA, mostrou-se eficaz. A integração dos dados anuais, o tratamento de informações incompletas e a aplicação da Análise Exploratória de Dados permitiram identificar padrões claros nas infrações ambientais ao longo do período estudado. O uso de tabelas de frequência e gráficos contribuiu para compreender a dinâmica da lavratura dos autos de infração nos diferentes estados, regiões e biomas, reforçando a confiabilidade da análise. Dessa forma, a metodologia empregada se mostrou adequada para explorar grandes volumes de dados e fornecer novas informações sobre a dinâmica das infrações ambientais no Brasil.

Foi possível analisar os padrões de infrações em cada bioma e região e compreender as especificidades de cada um. Essa análise fundamentou a elaboração de recomendações direcionadas para cada grupo, sugerindo medidas de fiscalização, manejo sustentável, prevenção de queimadas e políticas públicas alinhadas à legislação ambiental brasileira, bem como ao papel do IBAMA e demais órgãos ambientais. A metodologia não apenas validou os dados, como também forneceu a base necessária para propor estratégias concretas de mitigação e conservação da biodiversidade nos diferentes biomas do país.

A análise dos dados evidencia que os impactos ambientais nos biomas brasileiros envolvem interações complexas entre atividades humanas, fatores climáticos e práticas culturais. Estratégias integradas de fiscalização, educação, manejo sustentável e cumprimento

da legislação, com destaque para o papel do IBAMA como órgão federal coordenador, são fundamentais para reduzir infrações, conservar a biodiversidade e promover o uso sustentável dos recursos naturais. A combinação de medidas preventivas, educativas e punitivas oferece o caminho mais eficaz para enfrentar os desafios ambientais em diferentes regiões do país, garantindo a preservação de ecossistemas críticos e a sustentabilidade das atividades humanas.

Devido a diferentes padrões de degradação nos estados e biomas brasileiros, indicamos a necessidade de estratégias específicas de fiscalização, manejo e políticas públicas.

No estado de Minas Gerais, que engloba infrações relacionadas à fauna na Mata Atlântica, a prevalência de autos de infração evidencia a pressão sobre espécies silvestres, sobretudo avifauna, reforçando a importância de ações de combate ao tráfico, monitoramento inteligente e programas de educação ambiental. A integração entre IBAMA, ICMBio, Polícia Federal e órgãos estaduais se mostra crucial para coibir práticas ilegais e proteger espécies ameaçadas.

No Bioma Amazônia, as infrações de flora mostram a correlação entre desmatamento ilegal, exploração madeireira e queimadas, particularmente nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas. A fiscalização territorial, combinada com a aplicação rigorosa do Código Florestal e o incentivo à produção sustentável, é essencial para reduzir a perda de vegetação nativa e preservar a biodiversidade. Programas de prevenção de queimadas e manejo florestal legal se mostram eficazes em mitigar impactos ambientais e promover alternativas econômicas menos degradantes.

No estado do Mato Grosso, ecótono dos biomas Amazônia e Cerrado, as infrações estão fortemente associadas à expansão do agronegócio, incluindo soja e pecuária. A intensificação da fiscalização em áreas de transição, aliada ao monitoramento remoto, ao controle rigoroso do uso do fogo e à educação ambiental, é fundamental. Além disso, políticas de incentivo ao manejo sustentável, capacitação de produtores e aplicação efetiva do Código Florestal podem reduzir a ocorrência de desmatamento não autorizado e fortalecer a conservação da vegetação nativa.

No região Nordeste, com 97% do bioma Caatinga nesta região, observa-se que a degradação do bioma resulta tanto de práticas tradicionais de subsistência quanto de atividades agrícolas que utilizam corte-e-queima e extração de biomassa. Recomenda-se promover manejo sustentável de recursos vegetais, prevenção de queimadas, educação ambiental e políticas de restauração ecológica, aliando conhecimento científico e saberes tradicionais. A conscientização das comunidades locais sobre as leis ambientais, combinada com incentivos para práticas sustentáveis, é essencial para proteger a biodiversidade e a resiliência ecológica da Caatinga.

A região Sul possui muitos remanescentes do bioma Mata Atlântica, e onde se localiza a formação florestal com uma espécie criticamente ameaçada, é a região mais negligenciada pelo poder público federal no combate aos ilícitos ambientais. Recomenda-se aumentar a fiscalização ambiental nesta região, em todas as esferas do poder público, especialmente nas regiões com os remanescentes mais ameaçados desta formação do bioma Mata Atlântica. Além de trabalhos de sensibilização com as comunidades locais.

Referências

- ARAÚJO, A. M. de; CAVALCANTE, L. V. Extração de Lenha e Produção de Carvão em Várzea (PB): Reflexões acerca do uso insustentável da Caatinga. *Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 6, n. 2, p. 574–599, 2024.
- ASSUNÇÃO, J., GANDOUR, C., ROCHA, R. DETER-ing Deforestation in the Amazon: Environmental Monitoring and Law Enforcement. *American Economic Journal: Applied Economics*, 15(2): 125–156, 2023.
- BARONE, R., MASCIANDARO, D. Green Grease: Environmental Crime, Corruption and Money Laundering. *Kyklos* 78, 2025.
- BÖRNER, J, KIS-KATOS, K., HARGRAVE, J., KÖNIG, K. Post-Crackdown Effectiveness of Field-Based Forest Law Enforcement in the Brazilian Amazon. *PLoS ONE* 10(4), 2015.
- BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Institui a Lei de Crimes Ambientais. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1998.
- BRASIL. Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispões sobre sanções administrativas ao meio ambiente. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2008.
- CARMO, F. F., KAMINO, L. H. Y., COSTA, L. M. O comércio ilegal de fauna em Minas Gerais - as 15 espécies de aves mais traficadas no estado: conhecer para preservar! Belo Horizonte: 3i Editora, 2020.
- CARVALHO, R.; RAUSCH, L.; GIBBS, H. K.; BASTOS LIMA, M. G.; BERNASCONI, P.; VALDIONES, A. P.; VASCONCELOS, A.; SILGUEIRO, V. Illegal deforestation in Mato Grosso: how loopholes in implementing Brazil's Forest Code endanger the soy sector. *Land*, v. 13, n. 11, p. 1828, 2024.
- CAVAGNARI, D. W., ANTIQUEIRA, L. M. O. R. Registros digitais de ocorrências ambientais para o Brasil: conservação, preservação e fiscalização. *Nativa, Sinop*, v. 12, n. 1, 2024.
- COSTA, D. P.; LENTINI, C. A. D.; CUNHA LIMA, A. T.; DUVERGER, S. G.; VASCONCELOS, R. N. et al. All Deforestation Matters: Deforestation Alert System for the Caatinga Biome in South America's Tropical Dry Forest. *Sustainability*, v. 16, n. 20, 9006, 2024.
- CREPIN, L. Do forest conservation policies undermine the soybean sector in the Brazilian Amazon? Evidence from the priority listing of municipalities. *Ecological Economics* 224, 2024.
- DAVIES, C. M. Toward a 'Green Intelligence'? The Intelligence Practices of Non- Governmental Organisations Which Combat Environmental Crime. *Laws* 14, 2025.
- DIAS, F., SUHADOLNIK, N., CAMARGO, H., SILVA, S. Predicting the pulse of the Amazon: Machine learning insights into deforestation dynamics. *Journal of Environmental Management* 362, 2024.
- FANG, K., WANG, S., HE, J., SONG, J, FANG, C., JIA, X. Mapping the environmental footprints of nations partnering the Belt and Road Initiative. *Resources, Conservation & Recycling* 164, 2021.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. *Conservation Biology*, v. 19, n 3, 2005.

FEARNSIDE, P. M. Environmental policy in brazilian Amazonia: lessons from recent history. *Novos Cadernos NAEA*, v. 19, n 1, 2016.

FERREIRA, A. Amazon deforestation: Drivers, damages, and policies. *Land Use Policy* 160, 2025.

FRANCO, C. L. B., MORCATTY, T. Q., QUEIROZ, H. L., SORICE, M. G., FA, J. E., SOUZA, P. R., SOUZA, I. S., VALSECHI, J., BIZRI, H. R. E. Strengthening Amazon conservation through community-based voluntary patrolling. *Conservation Biology* 39:e70045, 2025.

FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E. Climatic aspects related to the distribution of Brazilian pine in the state of Santa Catarina. *Floresta*, v. 48, n. 4, p. 503-512, 2018.

FURUMO, P. R., LAMBIN, E. F. Policy sequencing to reduce tropical deforestation. *Global Sustainability* 4, e24, 2021.

GOLLNOW, F., & LAKES, T. Property-level direct and indirect deforestation for soybean production in the Amazon biome of Mato Grosso. *Land Use Policy*, 78, 212–225. 2018.

HAYWARD, T. Anthropocentrism: A Misunderstood Problem. *Environmental Values* 6, n.º 1, 1997.

IBAMA/MMA. Ministério do Meio Ambiente. Plano de Dados Abertos do Ibama (PDA) 2024-2026. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/acesso-a-informacao/arquivos/2024/20241114_Anexo_21159982_PDA_2024_2026.pdf>. Acesso em 11/02/2026.

IBAMA/MMA. Ministério do Meio Ambiente. Portal de Dados Abertos do Ibama. Brasília, 2026. Disponível em: < <https://dados.gov.br/dados/organizacoes/visualizar/instituto-brasileiro-do-meio-ambiente-e-dos-recursos-naturais-renovaveis-ibama>>. Acesso em 13/02/2026.

IBGE. Mapa de Biomas do Brasil. Brasília, 2004. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?edicao=16060&t=sobre>>. Acesso em 14/02/2026.

IBGE. Domínios e Regiões Naturais Terrestres dos Biomas do Brasil. Brasília, 2025. Endereço <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=2102232>. Acesso em 15/02/2025.

JEROZOLIMSKI, R., TAGLIARI, M. M., CAMPOS, J. R. R. Temporal Changes in Land Use Highlight the Vulnerability of Highland Grasslands in Protected Areas in Southern Brazil. *Biotropica*, 58:e70145, 2026.

LAURANCE, W. F. Conserving the hottest of the Hotspots. *Biological Conservation*, 142. 2009.

LEME, J. V. et al. Towards assessing the electricity demand in brazil: Data-driven analysis and ensemble learning models. *Energies*, v. 13, n. 6, 2020.

LI, J., HUANG, L., ZHAI, J., WANG, S. Reforming trade governance for sustainable resource flows: Ecologically unequal exchange in Pan-Eurasia. *Environmental Impact Assessment Review*, 118, 2025.

LIU, J., WANG, Y., LU, Y., ZHAO, P., WANG, S., SUN, Y., LUO, Y. Application of Remote Sensing and Explainable Artificial Intelligence (XAI) for Wildfire Occurrence Mapping in the Mountainous Region of Southwest China. *Remote Sens*, 16, 2024

LUEMBA, M. E. Análise Exploratória e Visualização de Dados Florestais Brasileiros a partir do Sistema DOF do IBAMA. Dissertação. Presidente Prudente, 2021.

MEDEIROS, M. G. Análise de Concentração do Carvão Vegetal no Estado da Paraíba (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba, 2017.

MOLINEZ, R. Z., CARMO, R. S., MOURÃO, C., SOLER, L., TURÍBIO, A., CURSINO, M. M. S., AMARAL, S. Historical and recent deforestation patterns in the Atlantic Forest from satellite monitoring system – PRODES. *Rev. Bras. Cartogr*, vol. 76, 2024

MOWLA, N., ASADI, D., MASUM, S., RABIE, K. Adaptive Hierarchical Multi-Headed Convolutional Neural Network With Modified Convolutional Block Attention for Aerial Forest Fire Detection. *IEEE Access*, 13, 2025.

MURADIAN, R., MAY, P. Innovations and Dilemmas in Global Forest Governance - The Tortuous Pathway toward a Deforestation-free World: Introduction to the Special Issue. *Ecological Economics* 241, 2025.

NELLEMANN, C.; HENRIKSEN, R.; KREILHUBER, A.; STEWART, D.; KOTSOVOU, M.; RAXTER, P.; MREMA, E.; BARRAT, S. The Rise of Environmental Crime – A Growing Threat To Natural Resources Peace, Development And Security. A UNEPINTERPOL Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and RHIPTO Rapid Response–Norwegian Center for Global Analyses, 2016.

NUNES, F. S. M., SOARES-FILHO, B. S., OLIVEIRA, A. R. et al. Lessons from the historical dynamics of environmental law enforcement in the Brazilian Amazon. *Sci Rep* 14, 2024.

OLIVEIRA, N. G. Tráfico de animais silvestres no Estado de Minas Gerais: legislação e impactos socioambientais. UNIFAL-MG, 2025.

PEDRO, A. A., JAVAN, F. D., GEORGIEVSKA, S., BARRETO, E., KU, O., OLIVEIRA, F., OLIVEIRA, P. P., GEVAERT, C. De Olho na Mata: monitoring Atlantic Forests with drones and few-shot learning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII, 2024.

QUESADA-RUIZ, L.C.; FERRER-VALERO, N.; GARCÍA-ROMERO, L. Characterization and Modelling of Environmental Crime: A Case Study Applied to the Canary Islands (Spain). *ISPRS Int. J. Geo-Inf* 14, 2025.

RABAIOTTI, D., WENTWORTH, J. Environmental Crime. POSTnote 547. London, 2017.

RAHM, E.; DO, H. H. Data cleaning: Problems and current approaches. *IEEE Data Eng. Bull.*, v. 23, n. 4, p. 3–13, 2000.

RODRÍGUEZ-BONILLA, L.D., QUESADA-ROMÁN, A. Land-use/land cover change for three decades and the environmental policies impacts on forest recovery in Chirripo ´ Pacífico catchment, Pérez Zeledón, Costa Rica. *Journal of Nature Conservation* 90. 2026.

SCHMITT, J. Crime sem castigo: a efetividade da fiscalização ambiental para o controle do desmatamento ilegal na Amazônia. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2015.

SENGUPTA, A., WOODFORD, B. J. Recent advances in explainable Machine Learning models for wildfire prediction. *Applied Computing and Geosciences* 27, 2025.

SOARES-FILHO, B. S., NEPSTAD, D., CURRAN, L., CERQUERIA, G., GARCIA, R., RAMOS, C., & McGRATH, D. Modeling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520–523, 2006.

SU, M., ZHENG, Y., ZHU, Y. Crime governance and nature conservation: spatial-temporal patterns and influencing factors of environmental crime in China. *Journal for Nature Conservation* 89, 2026.

TACCONI, L., RODRIGUES, R. J., MARYUDI, A. Law enforcement and deforestation: Lessons for Indonesia from Brazil. *Forest Policy and Economics* 108, 2019.

TEKE, A., KAVZOGLU, T. Explainable Artificial Intelligence to Unveil Intrinsic Characteristics of Conditioning Factors Governing Forest Fire Susceptibility. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII, 2025.

UNGAR, M. Prosecuting Environmental Crime: Latin America’s Policy Innovation. *Latin American Policy—Volume 8, Number 1—Pages 63–92*, 2017.

VASCONCELOS, A. S. S. Tráfico internacional de animais silvestres no Brasil. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*. v. 9, n. 5, p. 4390-4413, 2023.

VON ESSEN, M., LAMBIN, E. F. Jurisdictional approaches to sustainable resource use. *Front Ecol Environ* 19(3):159–167, 2021.

WREGE, M. S. Distribuição natural e habitat da Araucária frente às mudanças climáticas globais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 37, n. 91, p. 331, 2017.