



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise da Regeneração da Vegetação Pós-Fogo no Bioma Caatinga – Brasil, no Período de 2002-2021

Amanda Cavalcante da Silva¹, Ronie Silva Juvanhó^{1*}, Jonathan da Rocha Miranda², Alexandre Rosa dos Santos³

¹Universidade Federal do Piauí/UFPI, Campus Professora Cinobelina Elvas, BR 135, km 01, Planalto Horizonte, 64900-000, Bom Jesus, PI, E-mail: amandacavalcante095@gmail.com – ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6275-4970>; roniejuvanhó@ufpi.edu.br – ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0040-3382>;

²Instituto Federal de Minas Gerais/IFMG, Campus São João Evangelista, Av. Primeiro de Junho, 1043, Centro, 39705-000, São João Evangelista, MG, E-mail: jonathan.rocha@ifmg.edu.br – ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9236-1369>;

³Universidade Federal do Espírito Santo/UFES, Campus Alegre, Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000, Alegre, ES, E-mail: mundogeomatica@yahoo.com.br – ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2617-9451>

*Autor Correspondente: roniejuvanhó@ufpi.edu.br

Artigo recebido em 20/06/2024 e aceito em 04/06/2025

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar a regeneração da vegetação pós-fogo no bioma caatinga, no período 2002-2021, através dos produtos do sensor MODIS MCD64A1 e MOD13Q1. Foram realizadas a análise da camada de vegetação primária do produto MOD13Q1, e a análise de áreas queimadas do MCD64A1. Foi aplicado o filtro de média móvel nos dados de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e a reclassificação das imagens do MCD64A1. Para avaliar a regeneração da vegetação considerou-se uma área regenerada àquela que apresentou um NDVI com valores acima de 80% da imagem referência de NDVI antes da queima. Aplicado também para 90 e 95%. A rotina do processamento foi executada no *Google Earth Engine*. Os resultados indicam que 96.128 km² do bioma foram queimados nos 19 anos de estudo. O ano que mais teve ocorrências de fogo foi 2021. Considerando uma taxa de 80% de regeneração, um ano após o evento de fogo, a maioria dos fragmentos regeneraram e mantiveram no ano seguinte. Quanto mais altas as taxas de regeneração, menos fragmentos regenerados foram observados. Em 2015, 91% das áreas não regeneraram e somente 3% regeneraram no primeiro ano e mantiveram no segundo ano. Quanto menor as áreas queimadas, mais rápida é a regeneração desses fragmentos.

Palavras-chave: Conservação; Sensoriamento remoto; NDVI; Incêndios florestais; Restauração ecológica.

Analysis of Post-Fire Vegetation Regeneration in the Caatinga Biome – Brazil, in the Period 2002-2021

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the regeneration of post-fire vegetation in the caatinga biome, in the period 2002-2021, through the MODIS MCD64A1 and MOD13Q1 sensor products. The analysis of the primary vegetation layer of the MOD13Q1 product and the analysis of burned areas of the MCD64A1 were carried out. The moving average filter was applied to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data and the reclassification of the MCD64A1 images. To evaluate vegetation regeneration, a regenerated area was considered to be one that presented an NDVI with values above 80% of the NDVI reference image before burning. Also applied to 90 and 95%. The processing routine was performed on Google Earth Engine. The results indicate that 96,128 km² of the biome were burned during the 19 years of study. The year with the most fire events was 2021. Considering an 80% regeneration rate, one year after the fire event, most of the fragments regenerated and maintained the following year. The higher the regeneration rates, the fewer regenerated fragments were observed. In 2015, 91% of areas did not regenerate and only 3% regenerated in the first year and maintained it in the second year. The smaller the burned areas, the faster the regeneration of these fragments.

Keywords: Conservation; Remote sensing; NDVI; Wildfires; Ecological restoration.

Introdução

O bioma caatinga localizado no semiárido brasileiro é considerado a região semiárida mais populosa do mundo (Jardim et al., 2022), abriga uma proporção significativa da biodiversidade global de plantas, que contribui extensivamente para os ciclos biogeoquímicos e fornecem inúmeros serviços ecossistêmicos. Essa região natural brasileira, está entre os ecossistemas mais ameaçados e é proporcionalmente a menos estudada, apesar de sua importância ecológica (Dombroski et al., 2011).

Durante as últimas décadas, a caatinga foi amplamente afetada por mudanças antropogênicas (Araujo et al., 2023; Marques et al., 2020), resultante da exploração insustentável de seus recursos naturais, implicando na perda de espécies, únicas e fundamentais aos processos ecológicos que mantêm o bioma (Menezes et al., 2012). O bioma vem interagindo com significativas práticas de mudança de uso e cobertura da terra ao longo dos anos, no qual o fogo é considerado o principal elemento condicionante devido, especialmente, ao seu amplo uso como ferramenta de manejo da terra para fins agrícola (Alencar et al., 2022).

Portanto, as atividades humanas, principalmente as relacionadas a atividades agrícolas, a cada ano impulsiona o aumento da frequência de ocorrência de fogo no bioma, podendo resultar em eventos extremos e causar perdas irreversíveis ao ambiente (Guerrero et al., 2020). Somado ao cenário das mudanças climáticas e outros distúrbios antrópicos, apresenta potencial de impactar a distribuição da riqueza de espécies na região e a prestação de serviços ecossistêmicos, além de danos socioeconômicos na região afetada (Seixas et al., 2022).

Assim, é evidente a necessidade de uma atenção maior no gerenciamento e controle do uso do fogo no bioma. As adoções de medidas são fundamentais para melhorar as ações práticas de conservação e construção de um cenário futuro ambientalmente orientado, com planejamento e gestão sustentável dos recursos naturais, entre outras aplicações sociais (Fendrich et al., 2020; Souza Junior et al., 2020).

Novas tecnologias, métodos e modelos são capazes de contribuir para mitigar a ocorrência de incêndios florestais, tanto para planejar o controle e a supressão, quanto para evitar prejuízos sociais e econômicos. Além disso, essa temática preocupa a comunidade internacional devido aos aspectos ambientais relacionados e, portanto, tem alcance global (Silva et al., 2021; Bolano et al., 2022).

Nesse cenário, o sensoriamento remoto é considerado uma alternativa para o desenvolvimento de ferramentas robustas no gerenciamento sustentável do ambiente; a partir do fornecimento de estatísticas confiáveis, quantificação de impactos ecológicos e econômicos, identificação de agentes que controlam a atividade do fogo com o objetivo de implementar planos eficazes pré-fogo e medidas de mitigação, a partir da geração de informações de dados de satélites (Katagis e Gitas, 2022).

Essas informações podem ajudar a construir um histórico de incêndios, localizar focos, mapear áreas queimadas, determinar o número de ignições, a topografia, as condições da vegetação, o clima e outros parâmetros em resoluções espaço-temporais consideravelmente mais finas (Nyongesa et al., 2023). Fundamental para entender os processos ecossistêmicos e para a elaboração de estratégias de manejo eficazes, principalmente no contexto das mudanças climáticas globais (Baeza et al., 2022).

Os produtos do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), em especial, têm sido muito usados na literatura mais do que qualquer outro conjunto de dados de incêndio global (Boschetti et al., 2019). Considerado a melhor fonte de dados de área queimada em relação a outros sensores, por fornecer uma compensação entre o mapeamento no tempo e no espaço, permitindo uma longa série temporal de mapeamento de área queimada, resultado da sua alta resolução temporal (Buthelezi et al., 2016), também disponibilizam dados para o monitoramento de cobertura vegetal, essencial no estudo das variações interanuais da fenologia causadas por fatores como passagem de fogo na área, estimados a partir de séries temporais de índices de vegetação (Nyongesa et al., 2023).

O sensor MODIS tem como principal abordagem o fornecimento de uma combinação de variáveis básicas de superfície de reflectância espectral, albedo e temperatura da superfície terrestre, bem como variáveis de ordem superior, como índices de vegetação (IV), índice de área foliar (IAF), fração de absorção, radiação fotossinteticamente ativa, incêndios ativos, áreas queimadas e cobertura de neve e gelo (Justice et al., 1998).

O sensor MODIS é o principal instrumento presente nos satélites Terra e Aqua que integram o “*Earth Observing System*” (EOS) financiado pelo programa da NASA “*Earth Science Enterprises*” (ESE). Esse sensor vem gerando uma série de

produtos para atender as demandas da agência de Ciência da Terra da NASA desde fevereiro de 2000 (Justice et al., 2002). As órbitas dos satélites são sincronizadas para que um passe de norte a sul na linha do equador durante a manhã (TERRA), e o outro passe de sul para norte no período da tarde (AQUA) (Latorre et al., 2003).

Esse sensor é destaque em estudos que avaliam a restauração da vegetação pós-fogo em grandes áreas devido às suas vantagens de alta resolução temporal, resolução espacial média para aplicação de observação da superfície terrestre e acessibilidade gratuita (Justice et al., 2002). A identificação das tendências de aumento da regeneração da vegetação após eventos de fogo é um passo fundamental para a implementação de estratégias que garantam a recuperação de um ecossistema. Essas análises espaciais de regeneração, sobretudo, para o bioma caatinga, são escassas e necessárias para o desenvolvimento de políticas e ações públicas (Maillard, 2023).

A análise da dinâmica da regeneração vegetal, tem sido amplamente utilizada em muitos estudos, por exemplo, na avaliação da vegetação sobre influência de recorrência de fogo (Santana, 2019) e avaliação dos efeitos da vegetação pós-fogo (Caccamo et al., 2015). É uma análise fundamental para avaliar parâmetros, como por exemplo a descrição de padrões fenológicos de áreas atingidas pelo fogo especialmente na região do bioma caatinga, devido à sua heterogeneidade, sazonalidades e às múltiplas ações antrópicas que o bioma sofre a cada ano. Portanto, nesse ambiente, cresce a importância da representação temporal e espacial dos parâmetros da vegetação, através de índice de vegetação como o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) (Silva et al., 2020), que oferece um mecanismo para monitorar a dinâmica da vegetação fotossinteticamente ativa em diferentes escalas espaciais e temporais (Cai et al., 2017).

Essas análises, no entanto, requerem processadores robustos e espaços para o armazenamento de um grande volume de dados, nesse contexto, tem-se a plataforma de processamento de dados *Google Earth Engine* (GEE) usada nesta pesquisa, como uma importante alternativa, pela sua eficiência melhorada na extração de informações de imagens de satélite, uso de linguagens de programação em nuvem de código aberto e, principalmente, pela otimização do tempo de processamento e de armazenamento de informações (Gorelick et al., 2017), como também pela praticidade em implementar algoritmos e processar grandes volumes de dados (Munawar et al., 2021).

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a regeneração da vegetação queimada para todo o bioma caatinga, no período de 2002-2021, por meio de dois produtos do sensor MODIS, produto de área queimada MCD64A1 e o produto de cobertura vegetal MOD13Q1. Adicionalmente foi realizada uma análise da relação entre o tamanho da cicatriz de queima e a taxa de regeneração da vegetação.

Metodologia

Área de Estudo – a área de estudo compreende o bioma caatinga; uma região que possui alta diversidade ecológica, que abrange uma área de aproximadamente 70% do nordeste brasileiro. O bioma corresponde a maior e mais contínua extensão de Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS), da América do Sul (Mendes et al., 2020), com seu domínio estendido por cerca de 900.000 km², presente em 10 estados brasileiros: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe (Figura 1).

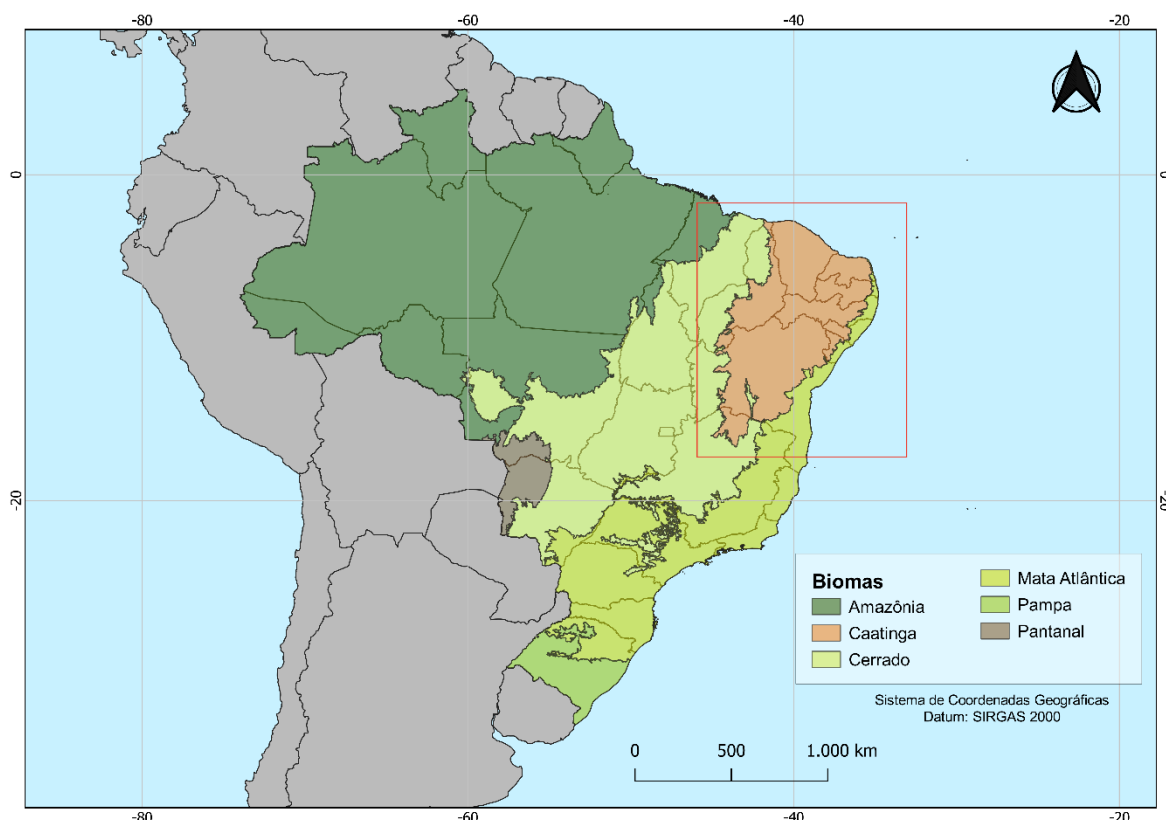


Figura 1 - Localização da área de estudo.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo BSh, caracterizado como tropical semiárido, com precipitações médias anuais abaixo de 1.000 mm e temperatura média anual acima de 27°C, também com regiões de Clima Árido (BWh), de precipitação anual menor que 250 mm e temperaturas médias anuais em torno de 33° C (Francisco et al., 2015; Beck et al., 2018).

O padrão pluviométrico é irregular ao longo do ano, devido a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A sazonalidade das chuvas é considerada um fator relevante nas variações de abundância das populações de plantas da caatinga e da distribuição das espécies (Gomes et al., 2016; Galvêncio et al., 2020).

A vegetação predominante no bioma apresenta sua distribuição condicionada às variações climáticas e ambientais, principalmente a intensidade e frequência das chuvas, com diferentes mosaicos florísticos, constituídos por uma área de vegetação arbórea e arbustiva, com presença de espécies caducifólias adaptadas a condições de déficit hídrico, com significativa produção de biomassa em épocas de chuvas. O bioma caatinga abriga uma variedade de espécies endêmicas, muitas das quais não são encontradas

em nenhum outro lugar do mundo (Silva *et al.*, 2020; Jardim et al., 2022).

Base de Dados – para realizar as análises neste estudo, foram utilizados os produtos do sensor MODIS, abordo dos satélites Terra e Aqua da NASA. O conjunto de dados foram compostos pelos produtos MODIS MCD64A1 que mapeia a extensão espacial e a data aproximada da queima de biomassa e o produto MODIS MOD13Q1, que fornece camadas de vegetação primária. Ambos os produtos foram utilizados as versões 6.

O produto MODIS MCD64A1 é lançado mensalmente com uma resolução espacial de 500 m e rotula cada pixel queimado como o dia juliano em que esse pixel foi queimado. É aplicado o cálculo de limiares dinâmicos ao índice de vegetação sensível à queima gerado a partir dos produtos de reflectância de superfície de 500m Terra (“MOD09GH”) e Aqua (“MYD09GH”) (Shah et al., 2022).

Já o produto MODIS MOD13Q1, as imagens são geradas a cada 16 dias com resolução espacial de 250 metros como um produto de Nível 3, sendo o valor do pixel derivado da média das melhores condições observacionais desse período. A seleção depende dos critérios: cobertura de

nuvem e ângulo de visão mínimos, e os valores do índice de vegetação mais altos (Didan, 2015).

Essas características foram importantes na escolha dos produtos, em conjunto com a alta disponibilidade temporal dos produtos do sensor MODIS. Sendo assim, foi realizada a análise da camada de vegetação primária, NDVI do produto MOD13Q1, para análise da regeneração (Didan, 2015), por permitir a identificação da presença de vegetação, a partir da análise da fenologia da vegetação. Para identificar as áreas queimadas foi utilizado o produto MCD64A1 que considera as bandas de reflectância de ondas curtas 5 e 7 do sensor MODIS corrigidas atmosféricamente.

Pré-processamento dos Dados – para o pré-processamento dos dados foram utilizadas duas técnicas principais, sendo elas a aplicação de filtro de média móvel nos dados de NDVI do MOD13Q1 para cada conjunto de 3 imagens e a reclassificação das imagens do MCD64A1. A primeira técnica aplicada, o filtro de média móvel, trata-se de um método simples para remoção de ruídos em séries temporais. Esse é um dos filtros mais simples de entender e aplicar (Chen et al., 2004), no qual consiste em uma técnica de suavização usada para correção atmosférica, baseada na eliminação dos valores baixos causados por efeitos atmosféricos e contaminação de nuvens, nebulosidade persistente, e outros efeitos negativos, que tendem a reduzir os valores de NDVI e desequilibrar os perfis temporais analisados, afetando os algoritmos que medem a fenologia da vegetação (Jin; Xu, 2013). Portanto, a aplicação dessa técnica permitiu reconstruir um conjunto de dados de NDVI mais robusto e de alta qualidade.

A segunda técnica, aplicada aos dados de área queimada do MCD64A1, consistiu em uma reclassificação de imagens. A técnica se baseou na análise dos dados dos pixels fornecidos pelo produto, no qual, foram classificados os pixels em área queimada ou não queimada. Para essa determinação foi considerado o valor igual a “1” para área queimada, igual a “0” para área não queimada. Como o MCD64A1 informa os valores dos pixels em dias julianos, todos os pixels com valores acima de 1 foram reclassificados como “1”, e do contrário, os abaixo de 1, reclassificados como “0”. Essa reclassificação foi aplicada para todo o conjunto de imagens de 2002 a 2021 nas áreas que compreende o bioma caatinga.

Processamentos dos Dados – após a reclassificação das imagens das cicatrizes de queima, passou-se à etapa de agregação temporal. Originalmente em uma estrutura mensal, as cicatrizes de queima

foram convertidas para uma frequência anual. Isso foi realizado somando-se os valores (indicando presença ou ausência de queima) de todos os meses dentro de um determinado ano.

Para permitir uma análise espacial mais detalhada e para facilitar a interação com os dados de NDVI, as cicatrizes de queima anualizadas foram transformadas em polígonos. De posse dos vetores foi integrado à sua tabela de atributo o NDVI cujo valor se encontrava contido no interior destes polígonos. O foco da análise estava em entender o vigor vegetativo antes e após os eventos de queima. Para tal, foi considerado o valor máximo de NDVI no ano em que a queima ocorreu, representando o pico de vigor da vegetação antes do evento de queima (valor de referência). Adicionalmente, para monitorar a recuperação da vegetação, para um e dois anos após o incêndio, os valores máximos das imagens de NDVI em cada cicatriz de queima foram selecionados para o cálculo do valor da mediana.

Então, a regeneração da vegetação após eventos de queima foi considerada sob três proporções distintas de recuperação do NDVI em comparação ao seu valor anterior à queima. No primeiro cenário, a regeneração é reconhecida quando o NDVI recupera mais de 80% de seu valor pré-queima, enquanto no segundo, a regeneração é estabelecida quando atinge mais de 90%, enquanto no terceiro cenário a recuperação da vegetação é reconhecida quando o NDVI representa mais de 95% de seu valor pré-queima. A escolha destes limiares foi amparado pelo estudo de Gouveia et al. (2021) na Caatinga sobre a recuperação da vegetação pós distúrbios pelo fogo.

Análises dos Dados – primeiramente, foi realizado a análise espacial das áreas queimadas e o número de ocorrências durante os anos de 2002 a 2021 no bioma caatinga. Posteriormente, foram analisados temporalmente a regeneração no Bioma, para verificar o comportamento da regeneração ao longo dos anos, em percentual de áreas e de número de fragmentos regenerados.

Os fragmentos de vegetação, por sua vez, foram categorizados em quatro grupos distintos: aqueles que mostraram uma regeneração sustentada; os que apresentaram uma regeneração tardia; os que, após regeneração, sofreram degradação subsequente; e os que, não mostraram sinais de regeneração.

Outra dimensão importante do estudo foi a análise do comportamento da regeneração em diferentes classes de tamanho de áreas queimadas, de acordo com a sua frequência de ocorrência,

sendo elas; $0 \leq 25$ ha, $25 \leq 100$ ha, $100 \leq 200$ ha e ≥ 200 ha.

Então, foram confeccionados gráficos e mapas por meio de *software* livres utilizando o Excel para toda análise tabular, Rstudio para confecções dos gráficos e o Qgis versão 3.22.9 para

visualização espacial, por meio de mapas. A rotina do processamento do presente estudo, detalhado nos subtópicos acima, foi executada dentro da plataforma GEE, de acordo com o procedimento metodológico apresentado na Figura 2.

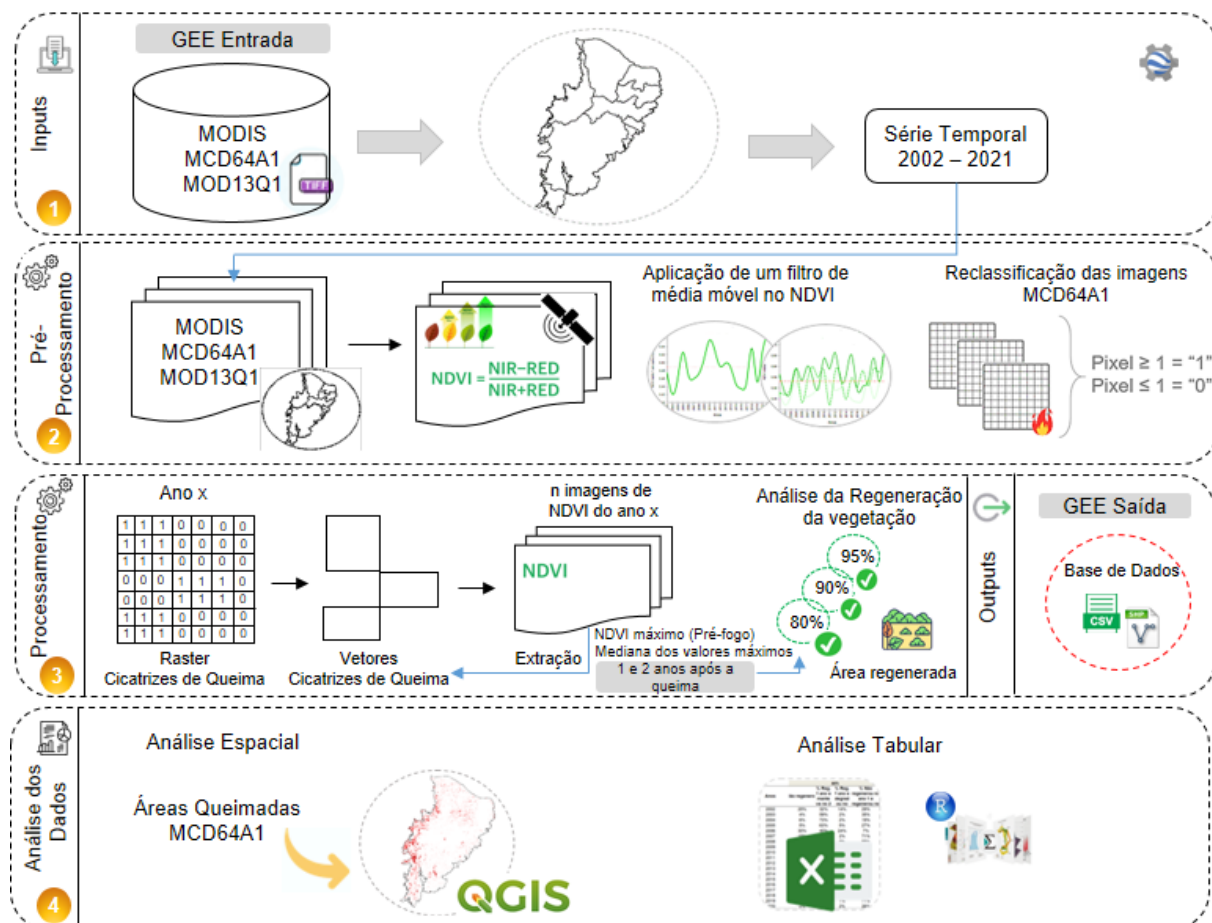


Figura 2 - Procedimento metodológico da pesquisa.

Resultados e discussão

O bioma sofreu com significativos eventos de fogo. A maior extensão de áreas queimadas é observada especialmente nas bordas do bioma, próximo a áreas de transição com o Cerrado (Figura 3). Nesta região, Martins et al. (2024) estudando os drivers do fogo no bioma observou uma relação positiva para a Formação Savana, temperatura e altitude entre 0 a 500m, com os

maiores valores de R^2 do modelo de Regressão Geograficamente Ponderada.

Segundo os autores, os padrões espaciais de incêndios na Caatinga podem ser compreendidos pela distribuição das chuvas e a subsequente disponibilidade de biomassa. Particularmente na porção sul da região nordeste, abrangendo áreas como oeste da Bahia e norte de Minas Gerais exibem uma relação inversa entre níveis de precipitação e incidência de incêndios (Rocha et al., 2024).

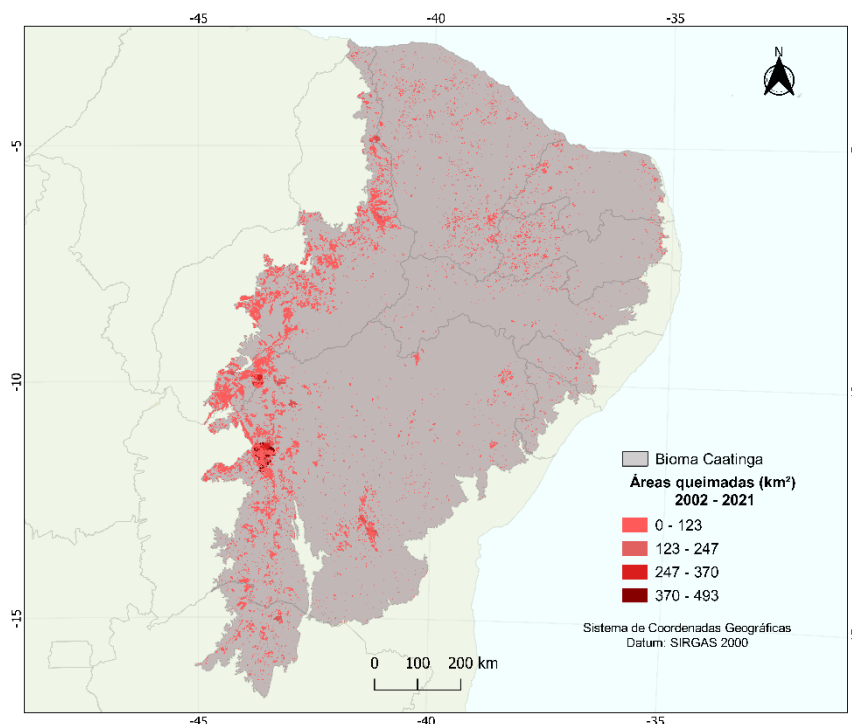


Figura 3 - Distribuição espacial das áreas queimadas durante os anos de 2002 – 2021.

Quando uma área é afetada pelo fogo, os atributos funcionais do ecossistema podem ser alterados. Esta realidade está relacionada com a substituição da vegetação para agropecuária. Baseado na análise da evolução anual da cobertura e uso da terra do projeto MapBiomias¹, o bioma Caatinga apresentou uma perda líquida de vegetação nativa de 6,5% e crescimento de 15,6% da área de agropecuária no período (2002-2021). Esse avanço impulsionou o aumento das ocorrências de fogo em práticas agrícolas. Souza et al. (2017) ressaltam que a Caatinga, sofre com a existência da pecuária extensiva, projetos agropecuários, extrativismo vegetal e redução da vegetação nativa que aliam o uso do fogo nas suas atividades, resultando na perda imediata da diversidade biológica.

A compreensão dos padrões de fogo nos ecossistemas, principalmente no Piauí e na Bahia, estados com maior número e extensão de área queimada, são particularmente importantes, devido aos potenciais impactos e mudanças nos processos ecológicos. Silva et al. (2023), enfatiza que nestes estados, além do cumprimento da articulação institucional do governo federal na prevenção de queimadas previstas na Lei 12.651/12, é necessário estabelecer prioritariamente para essas regiões

programas mais intensivos de prevenção e gerenciamento dos incêndios.

A integração de tecnologias avançadas de sensoriamento remoto com sistemas de monitoramento terrestre melhora a precisão na detecção dos incêndios, permitindo a alocação de recursos e intervenções oportunas de estados e municípios em áreas e períodos críticos.

Apesar das recentes medidas do governo federal como a aprovação da Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (Lei 14.944/24) e o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas (PPCaatinga), é necessário maior fiscalização, fortalecimento dos programas estaduais na promoção da educação ambiental e maior incentivo da cooperação interestadual.

Esse cenário indica os imensos desafios que o bioma enfrenta em relação à conservação de seus ecossistemas naturais. Sobretudo, as áreas de transição entre ecossistemas são apontadas como sensíveis às atividades antrópicas que tem o fogo como ferramenta (Smith et al., 2001). Estas áreas são consideradas de alto interesse ecológicos, por possuírem uma diversidade biológica única e alta em múltiplos níveis, de genes a comunidades, o que, portanto, as tornam em áreas de alto interesse de conservação (Anadon et al., 2014).

¹ Projeto MapBiomias – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 06 de Silva, A. C., Juvanhol, R. S., Miranda, J. R., Santos, A. R.

junho de 2024 através do link:
<https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/>

Além disso, as abordagens sobre ocorrências de fogo no Brasil são de grande relevância, principalmente, em ecossistemas com presença de paisagem com características inflamáveis, como o bioma caatinga. Informações detalhadas e consistentes sobre áreas queimadas em diferentes escalas espaciais e temporais, são de interesse social e econômico, fundamental para quantificação dos impactos ecológicos e econômicos que esses eventos causam. O fornecimento de informações dessas ocorrências a longo prazo é essencial para a comunidade científica e modeladores climáticos para validar a dinâmica da vegetação, estudar planos eficazes e medidas mitigatórias (Katagis e Gitas, 2022).

De acordo com os dados do produto MCD64A1, durante os 19 anos estudados, ocorreram cerca de 32.865 áreas queimadas no

bioma, correspondente a aproximadamente 96.128 km² queimados. Os eventos de fogo com maiores áreas queimadas foram observados nos anos de 2021 (11.309 km²), 2007 (9.731 km²) e 2015 (9.445 km²). O maior número de fragmentos foi observado nos anos de 2007 (3.180), 2003 (3.050) e 2004 (2.165), contudo, com proporção de áreas queimadas menores, exceto para o ano de 2007 (Figura 4). Rocha et al. (2024) utilizando modelos de rede neural profunda com base em mosaicos de qualidade anual derivados do Landsat e valores mínimos do índice Normalized Burned Ratio (NBR) também observaram ao longo do período de 38 anos (1985-2023) que o pico de área queimada ocorreu em 2021, o mês de outubro com a maior atividade de fogo e a savana o tipo de vegetação mais afetada.

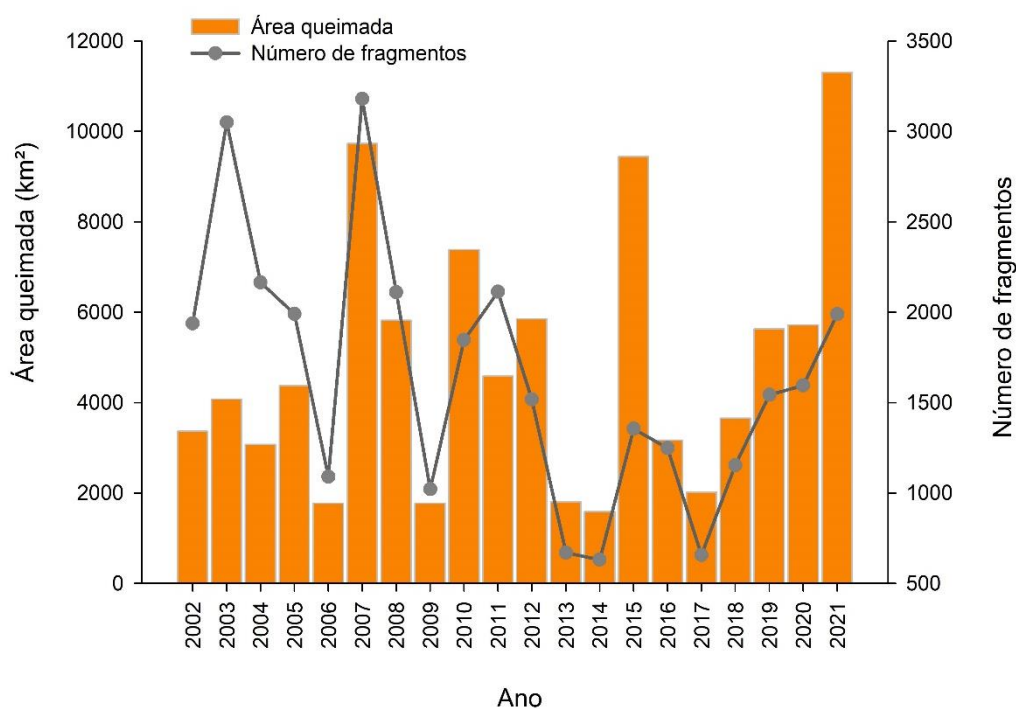


Figura 4 - Ocorrências e áreas queimadas no bioma caatinga entre os anos de 2002 a 2021.

Os resultados indicam, que nas últimas décadas, o bioma caatinga tem suportado extensos eventos de fogo (Figura 4), tornando-o fortemente ameaçado por ações antropogênicas, como no uso repetido do fogo no desmatamento, gerando a degradação da fauna e flora local. A agricultura de corte e queima muito praticada, apesar de muito antiga, é um exemplo generalizado dessas ações no bioma (Ribeiro et al., 2013; Silva, 2021). Silva et al. (2023) destacam que parte significativa das ocorrências de fogo nos estados do bioma ao longo desses anos, foram provenientes de incêndios maiores que 200ha, um indicativo de deficiência no

sistema de prevenção e combate estaduais. Este cenário é acentuado ao analisar o aumento da taxa de queima no período da Pandemia COVID-19 associado ao desmatamento. Em níveis percentuais, o bioma apresentou o maior crescimento de registros de focos de queima no período 2020-2021 em comparação com os outros biomas e um aumento de 46,8% da supressão de floresta segundo dados do Projeto MapBiomias.

Além disso, eventos climáticos extremos estão se tornando mais frequentes em todo o mundo, causando incêndios florestais e ondas de calor (Morales et al., 2023). Por exemplo, no

Brasil, a seca extrema causou um aumento no número de incêndios ativos em 2021. Esses incêndios ocorreram durante um período marcado pela falta de chuva, tempo seco e ventos fortes, entre junho e outubro, quando as condições climáticas favorecem a atividade do fogo devido a causas naturais ou intervenções humanas (INPE, 2025; Martins et al., 2024).

Estudos indicam ainda um aumento das zonas de alto risco de incêndios na Caatinga Ocidental nas projeções futuras sob cenário SPP5-8.5 de alta emissão industrial até a década de 2030, enfatizando a vulnerabilidade da região sob aumento da temperatura e das atividades humanas na formação dos regimes de incêndio (Vasconcelos et al., 2025).

O combate às queimadas ligadas ao avanço do agronegócio na faixa de transição do bioma com o Cerrado exige maior empenho dos órgãos de fiscalização. Os ciclos recorrentes do uso do fogo nessas práticas, esgotam os nutrientes do solo e reduzem drasticamente o número de espécies florestais (Oliveira et al., 2022). Uma vez que, esses fatores interferem na qualidade da vegetação

em longo prazo, podem alunar os mecanismos de regeneração, impedindo ou retardando a recuperação da floresta, causando danos e desequilíbrios àquele ambiente (Silva, 2021).

Assim como outras perturbações, a extensão, frequência e intensidade do fogo são fatores potenciais para alteração da dinâmica da regeneração vegetal (Benfica et al., 2021). Portanto, a compreensão dos diferentes intermediários das mudanças na estrutura e regeneração da vegetação da caatinga pode contribuir com ações de manejo para evitar por exemplo a desertificação desse ambiente e atingir os objetivos de conservação (Marinho et al., 2016).

Dessa forma, compreender como o fogo afeta a regeneração das plantas é fundamental para identificar o nível de vulnerabilidade da vegetação em um contexto de frequência de fogo maior e com alta intensidade no bioma caatinga (Maillard, 2023; Parra e Hinojosa, 2023). Ao avaliar a regeneração das áreas queimadas com base no número de fragmentos observou-se um contraste significativo dependendo dos critérios de regeneração considerados (Figura 5).

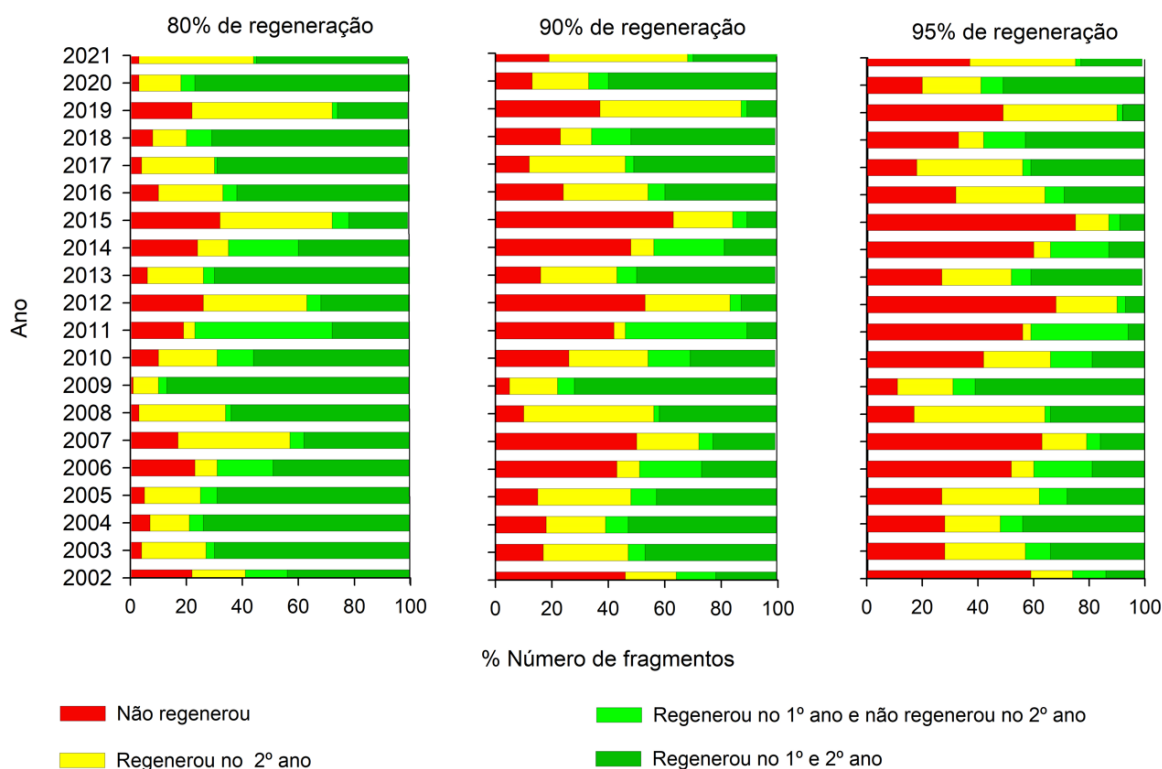


Figura 5 – Percentual do número de fragmentos regenerados durante os anos de 2002 a 2021 considerando o retorno do valor do NDVI a 80, 90 e 95% antes da queima.

Quando considerado a taxa de 80% de regeneração da vegetação foi possível observar na série temporal que em média 55% dos fragmentos regeneraram e mantiveram no ano seguinte. O ano

de 2009 se destacou com o maior percentual (87) de fragmentos nesta condição. Contudo, o ano de 2015 apresentou o maior percentual (32) de fragmentos não recuperados pós-fogo. Esta

condição é acentuada, quanto maior o limiar das taxas de regeneração, principalmente a 95%, que apenas 27% dos fragmentos sustentaram a regeneração e 40% não apresentou recuperação no período avaliado.

Os resultados deste estudo apontam para uma preocupação emergente dada as nuances da capacidade regenerativa da Caatinga após eventos de fogo. A diferença na capacidade de recuperação destas áreas pode estar ligada a fatores subestimados anteriormente, como a perda gradual de nutrientes do solo após sucessivos eventos de queima. A partir desta ótica é possível inferir que fragmentos regenerados apenas no primeiro ano são locais que apresentam uma queima sucessiva, ou seja, voltam a queimar no segundo ano. Silva et al. (2023), ao analisar a recorrência de fogo no bioma caatinga, durante os anos de 2001 a 2018, observaram que o bioma apresenta uma recorrência mais frequente de fogo de 1 a 5 vezes, com pico de 11 reincidências no período. Como consequência, o ambiente fica mais vulnerável e a recuperação da vegetação é dificultada, como evidenciado no ano de 2015, em que somente 14% do número de fragmentos queimados apresentaram regeneração nos anos subsequentes.

Um dos principais efeitos da passagem sucessiva do fogo sobre a vegetação é a transformação estrutural, como exemplo a redução de espécies lenhosas, e o favorecimento de espécies típicas de áreas abertas, como as gramíneas, uma vez que as queimas sucessivas motivam a formação de áreas mais abertas (Santana, 2019). Além disso, a passagem do fogo influencia um cenário de heterogeneidade na paisagem, impactando a dinâmica do processo de regeneração vegetal, em conjunto com as características biofísicas da região, como topografia, clima, solo e vegetação (Avetisyan et al., 2023).

Trabalhos revelam que o bioma caatinga em seu estado natural é formado por paisagens modificadas por ações antrópicas compostas por mosaicos sucessionais (Tabarelli et al., 2017). Esse cenário, e em particular o percentual de número de fragmentos observado neste trabalho, demonstra que o comportamento da regeneração do bioma nesses anos, pode ter sido impulsionado pela

rebrotas, como uma forma de persistência das espécies após o evento de fogo (Clarke et al., 2013).

Nesse espaço, existem diferentes mecanismos de regeneração que podem determinar a composição florística inicial dos fragmentos (Silva, 2021). Outra observação que deve ser considerada, é o número de fragmentos regenerados após dois anos da passagem do fogo. Alguns autores, como Meneses (2021) constataram em suas pesquisas que a regeneração da vegetação ocorre nos primeiros dois anos após o incêndio. O autor observou que áreas onde apresentaram mais vegetação relativamente à situação pré-fogo, demoraram cerca de 19 meses a regenerar toda a vegetação.

Em geral, as rápidas taxas de regeneração a partir de rebrotas dessas áreas, apontam uma alta resiliência do bioma, contudo, essa narrativa é questionada por alguns autores como um ponto de atenção, pois uma vez que as ocorrências de fogo, seja no cultivo itinerante e outras atividades antrópicas, ao favorecer potencialmente espécies em rebrota, podem afetar tanto a resiliência da vegetação quanto as trajetórias sucessionais, podendo não se adequarem às condições do ambiente, influenciando de forma negativa na sua perpetuação nesses fragmentos (Barros et al., 2021).

Também foi avaliado o comportamento da regeneração da vegetação em relação ao total de áreas queimadas (Figura 6). De maneira análoga à regeneração baseada no número de fragmentos, observa-se uma tendência similar ao avaliar a regeneração em função da área. Contudo, o percentual de áreas não regeneradas é mais expressivo nos maiores limiares de regeneração. O ano de 2007 e 2015, mesmos anos que apresentaram a segunda e terceira maior área queimada, respectivamente (Figura 4) se destacam, visto que, considerando a maior porcentagem de regeneração, cerca de 83% e 91% das áreas não regeneraram nestes anos e somente 5% e 3% dessas áreas queimadas regeneraram e mantiveram no segundo ano.

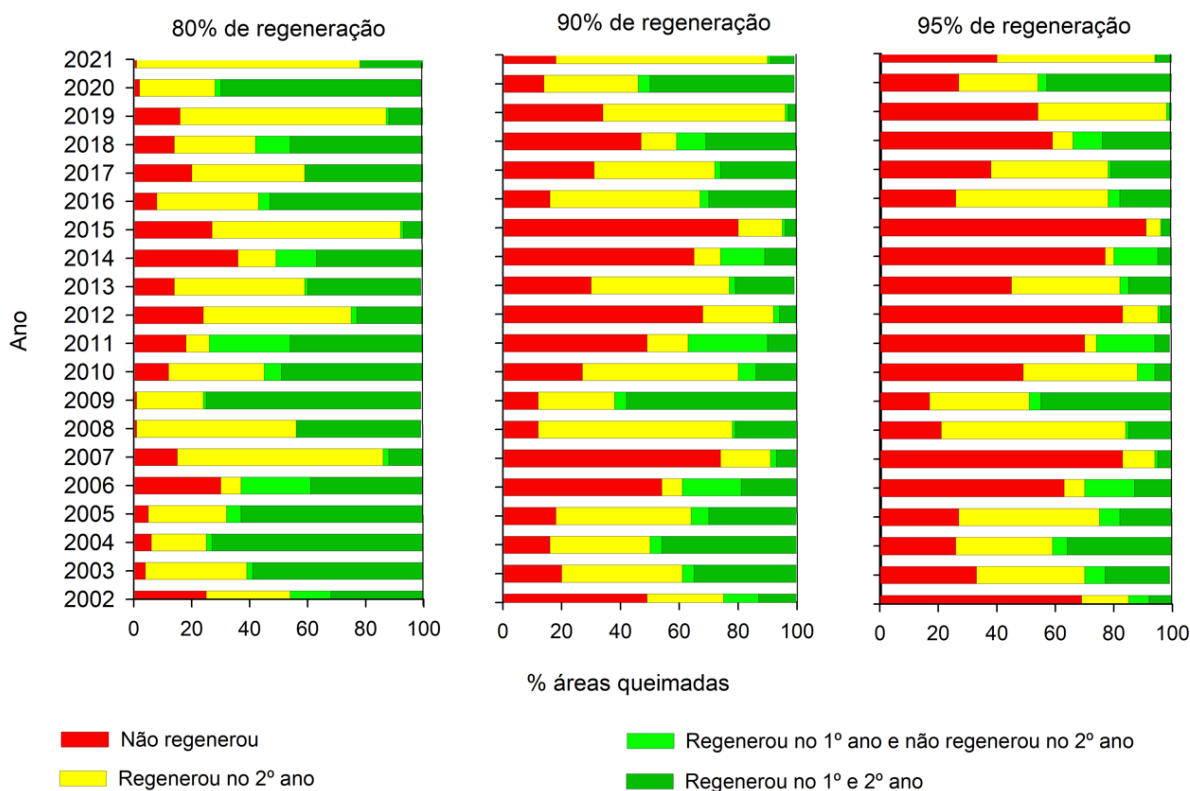


Figura 6 – Percentual da taxa de regeneração da vegetação em áreas queimadas durante os anos de 2002 a 2021 considerando o retorno do valor do NDVI a 80, 90 e 95% antes da queima.

Um importante fator sobre a dinâmica de recuperação da vegetação em áreas queimadas são as espécies presentes e o tamanho da vegetação antes da ocorrência (Lentile et al., 2007; Viana et al., 2017) e sua suscetibilidade ao fogo e os meios pelos quais elas se recuperam após o fogo. Depende também do estado do solo, severidade da ocorrência, do banco de sementes disponível, e as condições meteorológicas ou características climáticas (Meneses, 2021).

Gouveia et al. (2021) atestou esta condição em um estudo na Mesorregião do Sertão e São Francisco Pernambucano que a rápida recuperação da vegetação pós-fogo esteve relacionada ao período chuvoso no mês de novembro de 2017 e 2019, com uma correlação de 91,76% entre a precipitação local e os valores de NDVI. Contudo, o ano de 2015, considerado como seco, não foi constatado recuperação da vegetação após 30 e 48 dias do incêndio.

A relação da regeneração vegetal e o tamanho das áreas queimadas no bioma caatinga, foram também estudadas em uma escala temporal de 19 anos. Assim, foi possível observar que, em geral, independentemente do nível de restrição de regeneração considerado, os resultados apontaram que quanto menor as áreas queimadas, mais rápido é a regeneração desses fragmentos (Tabela 1).

Nesse contexto, áreas de baixa e moderada severidade de queima apresentam uma resposta da vegetação mais rápida, geralmente, associado à disponibilidade no local de brotos, assim como o estabelecimento da vegetação através de sementes pós-fogo (Lentile et al., 2007). Na tabela 1, também se observa um comportamento semelhante aos já discutidos nesse trabalho, que a partir da resposta da vegetação ao fogo, quanto maior os percentuais analisados, por exemplo a 90 e 95%, maiores são as chances de se ter menos fragmentos considerados regenerados.

Tabela 1 - Análise de regeneração dos fragmentos regenerados em relação a diferentes classes de tamanho.

	Classes de tamanho (ha)	% Não regenerou	% Regenerou e manteve	% Regenerou e perdeu	% Regenerou em dois anos
80%	$0 \leq 25$	10	59	11	20
	$25 < 100$	13	56	9	23
	$100 < 200$	14	52	9	25
	≥ 200	14	44	6	36
90%	$0 \leq 25$	26	39	12	24
	$25 < 100$	29	37	10	25
	$100 < 200$	33	32	9	26
	≥ 200	36	24	7	34
95%	$0 \leq 25$	37	30	11	21
	$25 < 100$	40	27	10	23
	$100 < 200$	44	23	9	24
	≥ 200	49	17	6	28

Esses resultados, reforçam que áreas extensas queimadas levam mais tempo para recuperar a estrutura e funções ecológicas devido à dispersão limitada de sementes e baixa resiliência de algumas espécies. A fragmentação do bioma impede a chegada de propágulos de áreas intactas reduzindo a regeneração natural.

A atual atividade de incêndios na Caatinga representa uma interrupção de seus processos ecológicos naturais em vez de uma continuação de sua história evolutiva. Isso representa uma ameaça significativa às espécies do bioma, muitas das quais não estão adaptadas a perturbações frequentes de incêndios, ampliando ainda mais o risco de degradação ecológica e perda de biodiversidade (Rocha et al., 2024).

Os planos de restauração pós-fogo no Brasil precisam ser ampliados para além das áreas afetadas pelos incêndios. Espécies-chave podem não retornar espontaneamente se as áreas limítrofes estiverem degradadas, e a restauração apenas no núcleo da cicatriz pode não ser suficiente para reestabelecer os processos ecológicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes e a interação entre plantas e polinizadores. Portanto, estudos devem ser conduzidos para estabelecer um buffer de restauração de forma que os efeitos de borda sejam minimizados e os planos mais eficientes.

Conclusões

Os resultados desse estudo trazem contribuições importantes sobre a regeneração da vegetação do bioma caatinga frente ao crescente aumento no regime de fogo, que o bioma vem sofrendo nas últimas décadas, verificado ao longo dos 19 anos estudados. Foram queimados cerca de 32.865 fragmentos, que corresponde a

aproximadamente 96.128 km². Os eventos de fogo com maiores áreas queimadas foram observados nos anos de 2021 (11.309 km²), 2007 (9.731 km²) e 2015 (9.445 km²). Os maiores números de fragmentos foram observados nos anos de 2007 (3.180), 2003 (3.050) e 2004 (2.165).

Ao analisar a dinâmica de regeneração da vegetação, independente do nível de restrição de regeneração considerado, notoriamente, quanto menor as áreas queimadas, mais rápido é percebido a regeneração desses fragmentos.

Finalmente, esse trabalho reforça a necessidade da conservação da rica biodiversidade do bioma caatinga, fornece importantes informações sobre o impacto do fogo intenso e frequente em um bioma criticamente sensível às mudanças climáticas, sobretudo, na sua regeneração vegetal. Incentiva, majoritariamente, esforços e estratégias governamentais que possam reduzir a ocorrência dos incêndios florestais no bioma.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Referências

- Alencar, A.A., Arruda, V.L., Silva, W.V.D., Conciani, D.E., Costa, D.P., Crusco, N., Velez-Martin, E., 2022. Long-term landsat-based monthly burned area dataset for the Brazilian biomes using deep learning. *Remote Sensing* 14, 2510, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14112510>
- Anadon, J.D., Sala, O.E., Maestre, F.T., 2014. Climate change will increase savannas at the

- expense of forests and treeless vegetation in tropical and subtropical Americas. *Journal of Ecology* 102, 1363-1373. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12325>
- Araujo, H.F.F., Canassa, N.F., Machado, C.C.C., Tabarelli, M., 2023. Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. *Scientific Reports*, 13, 18440. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45571-9>
- Avetisyan, D., Stankova, N., Dimitrov, Z., 2023. Assessment of Spectral Vegetation Indices Performance for Post-Fire Monitoring of Different Forest Environments. *Fire* 6, 290. <https://doi.org/10.3390/fire6080290>
- Baeza, S., Vélez-Martin, E., Abelleira, D., Banchemo, S., Gallego, F., Schirmbeck, J., Hasenack, H., 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 28, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>
- Barros, M.F., Ribeiro, E. M., Vanderlei, R.S., Paula, A.S., Silva, A.B., Wirth, R., Tabarelli, M., 2021. Resprouting drives successional pathways and the resilience of caatinga dry forest in human-modified landscapes. *Forest Ecology and Management* 482, 118881. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118881>
- Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E.F., 2018. Publisher Correction: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data* 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Benfica, N.S., Silva, D.P., Delgado, R.C., 2021. Dinâmica de áreas queimadas através de dados orbitais do sensor modis e influência climática no parque nacional da Chapada Diamantina. *Brazilian Journal of Development* 7, 75875-75890. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n8-014>
- Bolano, D.S., Camargo, C.Y., Soro, T.D., N'Dri, A.B., Bolaño-Ortiz, T.R., 2022. Spatio-Temporal Characterization of Fire Using MODIS Data (2000–2020) in Colombia. *Fire* 5, 134. <https://doi.org/10.3390/fire5050134>
- Boschetti, L., Roy, D.P., Giglio, L., Huang, H., Zubkova, M., Humber, M.L., 2019. Global validation of the collection 6 MODIS burned area product. *Remote sensing of environment* 235, 111490. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111490>
- Buthlezi, N.L., Mutanga, O., Rouget, M., Sibanda, M., 2016. A spatial and temporal assessment of fire regimes on different vegetation types using modis burnt area products. *Bothalia-African Biodiversity & Conservation* 46, 1-9. <http://dx.doi.org/10.4102/abc.v46i2.2148>
- Caccamo, G., Bradstock, R., Collins, L., Penman, T., Watson, P., 2015. Using MODIS data to analyse post-fire vegetation recovery in Australian eucalypt forests. *Journal of Spatial Science* 60, 341-352. <https://doi.org/10.1080/14498596.2015.974227>
- Cai, Z., Jonsson, P., Jin, H., Eklundh, L., 2017. Performance of Smoothing Methods for Reconstructing NDVI Time-Series and Estimating Vegetation Phenology from MODIS Data. *Remote Sensing* 9, 1271. <https://doi.org/10.3390/rs9121271>
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L., 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment* 91, 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- Clarke, P.J., Lawes, M.J., Midgley, J.J., Lamont, B.B., Ojeda, F., Burrows, G.E., Knox, K.J.E., 2013. Resprouting as a key functional trait: how buds, protection and resources drive persistence after fire. *New phytologist* 197, 19-35. <https://doi.org/10.1111/nph.12001>
- Didan, K., 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.
- Dombroski, J.L.D., Praxedes, S.C., Freitas, R.M.O., Pontes, F.M., 2011. Water relations of caatinga trees in the dry season. *South African Journal of Botany* 77, 430-434. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.11.001>
- Fendrich, A.N., Barretto, A., Faria, V.G., Bastiani, F., Tenneson, K., Pinto, L.F.G., Sparovek, G., 2020. Disclosing contrasting scenarios for future land cover in Brazil: Results from a high-resolution spatiotemporal model. *Science of the Total Environment* 742, 140477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140477>
- Francisco, P.R.M., Medeiros, R.D., Santos, D., Matos, R.D., 2015. Classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 1006-1016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150049>
- Galvêncio, J.D., Mendes, S.M., Morais, Y.C.B., Miranda, R.Q., Souza, W.M., Moura, M.S.B., Santos, W., 2020. Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do bioma

- caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 3304-3314. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3304-3314>
- Gouveia, J.R.F., Nascimento, C.R., Oliveira Júnior, J.G., Moura, G.B.A., Lopes, P.M.O., 2021. Caracterização de Cicatrizes de Queimadas nas Mesorregiões do Sertão e São Francisco Pernambucano a partir de dados do Sensor Modis. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 881-896. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p881-996>
- Gomes, V.P., Galvêncio, J.D., Moura, M.S.B., Ferreira, P.D.S., Paz, Y.M., Miranda, R.D.Q., 2016. Sensoriamento remoto hyperspectral aplicado para análise dos indicadores de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 1122-1136. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v09.4.p1122-1136>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guerrero, J.V., Escobar-Silva, E.V., Chaves, M.E., Mataveli, G.A., Bourscheidt, V., Oliveira, G., Moschini, L.E., 2020. Assessing land use and land cover changes in the direct influence zone of the Braço Norte Hydropower Complex, Brazilian Amazonia. *Forests* 11, 988 <https://doi.org/10.3390/f11090988>
- INPE 2025. Disponível em: BDQueimadas - Programa Queimadas, <<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>> Acesso em: 31 de Março de 2025.
- Jardim, et al., 2022. Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the caatinga biome of northeast Brazilian. *Remote Sensing* 14, 1911. <https://doi.org/10.3390/rs14081911>
- Jin, Z., Xu, B., 2013. A novel compound smoother—RMMEH to reconstruct MODIS NDVI time series. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10, 942-946. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2253760>
- Souza Junior, C.M. et al., 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing* 12, 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N., Morisette, J.T., 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote sensing of Environment* 83, 3-15. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)
- Justice, C.O., Vermote, E., Townshend, J.R., Defries, R., Roy, D.P., Hall, D.K., Barnsley, M.J., 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 36, 1228-1249. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- Katagis, T., Gitas, I.Z., 2022. Assessing the Accuracy of MODIS MCD64A1 C6 and FireCCI51 Burned Area Products in Mediterranean Ecosystems. *Remote Sensing* 14, 602. <https://doi.org/10.3390/rs14030602>
- Latorre, M.L., Anderson, L.O., Shimabukuro, Y.E., Carvalho, J.O.A., 2003. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. *Revista Espaço e Geografia* 6, 91-121.
- Lentile, L.B., Morgan, P., Hudak, A.T., Bobbitt, M. J., Lewis, S.A., Smith, A.M., Robichaud, P.R., 2007. Post-fire burn severity and vegetation response following eight large wildfires across the western United States. *Fire Ecology* 3, 91-108.
- Maillard, O., 2023. Post-Fire Natural Regeneration Trends in Bolivia: 2001–2021. *Fire* 6, 18. <https://doi.org/10.3390/fire6010018>
- Marinho, F.P., Mazzochini, G.G., Manhães, A.P., Weisser, W.W., Ganade, G., 2016. Effects of past and present land use on vegetation cover and regeneration in a tropical dryland forest. *Journal of Arid Environments* 132, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.04.006>
- Marques, T.V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A.M., Bezerra, B., 2020. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and Forest Meteorology* 287, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>
- Martins, S.F.S., Santos, A.M., Silva, C.F.A., Rudke, A.P., Alvarado, S.T., Melo, J.L.S., 2024. The drivers of fire in the Caatinga Biome in Brazil. *Forest Ecology and Management* 572, 122260. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122260>
- Mendes, K.R., Campos, S., Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., Santos e Silva, C.M., 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO2 exchange of a Brazilian seasonally dry

- tropical forest. *Scientific Reports* 10, 9454. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>
- Meneses, B.M., 2021. Vegetation Recovery Patterns in Burned Areas Assessed with Landsat 8 OLI Imagery and Environmental Biophysical Data. *Fire* 4, 76. <https://doi.org/10.3390/fire4040076>
- Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., Giongo, V., Pérez-Marin, A.M., 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the caatinga biome. *Brazilian Journal of Biology* 72, 643-653. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>
- Morales, F.E.C., Rodrigues, D.T., Marques, T.V., Amorim, A.C.B., Oliveira, P.T.D., Silva, C.M.S.E., Lucio, P.S., 2023. Spatiotemporal analysis of extreme rainfall frequency in the northeast region of Brazil. *Atmosphere* 14, 531. <https://doi.org/10.3390/atmos14030531>
- Munawar, H.S., Ullah, F., Khan, S.I., Qadir, Z., Qayyum, S., 2021. UAV assisted spatiotemporal analysis and management of bushfires: A case study of the 2020 victorian bushfires. *Fire* 4, 40. <https://doi.org/10.3390/fire4030040>
- Nyongesa, K.W., Pucher, C., Poletti, C., Vacik, H., 2023. Evaluation of the Relationship between Spatio-Temporal Variability of Vegetation Condition Index (VCI), Fire Occurrence and Burnt Area in Mount Kenya Forest Reserve and National Park. *Fire* 6, 282. <https://doi.org/10.3390/fire6080282>
- Oliveira, J.J.F., Shah, M., Abbas, A., Correia, W.L.F., Silva Junior, C.A., Santiago, D.B., Teodoro, P.E., Mendes, D., de Souza, A., Aviv-Sharon, E., 2022. Spatiotemporal Analysis of Fire Foci and Environmental Degradation in the Biomes of Northeastern Brazil. *Sustainability* 14, 6935. <https://doi.org/10.3390/su14116935>
- Parra, A.; Hinojosa, M.B., 2023. Burn Severity Effect on the Short-Term Functional Response of *Quercus ilex* after Fire. *Fire* 6, 286. <https://doi.org/10.3390/fire6080286>
- QGIS Desktop Version 3.22.9 Bialowiesza 2022-Jul-15 17:19 Disponível em: <https://download.osgeo.org/qgis/win64/>
- Ribeiro, F.A.A., Adams, C., Murrieta, R.S.S., 2013. The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas* 8, 693–727. <https://doi.org/10.1590/S1981-81222013000300013>
- Rocha, W.J.S.F., et al., 2024. Mapping Burned Area in the Caatinga Biome: Employing Deep Learning Techniques. *Fire* 7, 437. <https://doi.org/10.3390/fire7120437>
- Silva, A. C., Juvanhol, R. S., Miranda, J. R., Santos, A. R. RStudio Desktop. Version 4.2.1 (2022-06-23 ucrt). Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>
- Santana, N.C., 2019. Fire Recurrence and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Dynamics in Brazilian Savanna. *Fire* 2, 1. <https://doi.org/10.3390/fire2010001>
- Seixas, H.T., Brunsell, N.A., Moraes, E.C., Oliveira, G., Mataveli, G., 2022. Exploring the ecosystem resilience concept with land surface model scenarios. *Ecological Modelling* 464, 109817. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109817>
- Shah, S., Yebra, M., Aijm, V.D., Cary, G.J., 2022. A New Fire Danger Index Developed by Random Forest Analysis of Remote Sensing Derived Fire Sizes. *Fire* 5, 152. <https://doi.org/10.3390/fire5050152>
- Silva, A.B., 2021. Efeitos da Agricultura de Corte-e-queima sobre a regeneração da caatinga.
- Silva, C.D.D., Silva, L.M.C., Cavalcante, B.P., Santos, D.B., 2021. O domínio da caatinga e sua biodiversidade: concepções alternativas de alunos da educação básica. *Revista Macambira* 5, e052004. <https://doi.org/10.35642/rm.v5i2.618>
- Silva, E.E.D.M., Paixao, V.H.F., Torquato, J.L., Lunardi, D.G., Lunardi, V.O., 2020. Fruiting phenology and consumption of zoochoric fruits by wild vertebrates in a seasonally dry tropical forest in the Brazilian caatinga. *Acta Oecologica* 105, 103553, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103553>
- Silva, A.C., Juvanhol, R.S., Miranda, J.R., 2023. Variabilidade espaço-temporal de ocorrência e recorrência de fogo no Bioma Caatinga usando dados do sensor MODIS. *Ciência Florestal* 33, e70195. <https://doi.org/10.5902/1980509870195>
- Silva, F.R.D., Vasconcelos, R.S., Galvão, C.D.O., Rufino, I.A.A., Cunha, J.E.D.B.L., 2020. Representação matemática do comportamento intra-anual do NDVI no Bioma caatinga. *Ciência Florestal* 30, 473-488. <https://doi.org/10.5902/1980509837279>
- Silva, S.S., Oliveira, I., Morello, T.F., Anderson, L.O., Karlokoski, A., Brando, P.M., de Melo, A.W.F., da Costa, J.G., de Souza, F.S.C., da Silva, I.S., et al., 2021 Burning in southwestern Brazilian Amazonia, 2016-2019. *Journal of Environmental Management* 286, 112189. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112189>
- Smith, T.B., Kark, S., Schneider, C.J., Wayne, R.K., Moritz, C., 2001. Biodiversity hotspots and beyond: the need for preserving

- environmental transitions. *Trends in Ecology & Evolution* 16, 431.
[https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(01\)02201-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02201-7)
- Souza, M.P., Coutinho, J.M.C.P., Silva, L.S., Amorim, F.S., Alves, A.R., 2017. Composição e estrutura da vegetação de caatinga no sul do Piauí, Brasil. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 12, 210-217.
<https://doi.org/10.18378/rvads.v12i2.4588>
- Tabarelli, M., Leal, I.R., Scarano, F.R., Silva, J.M.C.D., 2017. The future of the caatinga. Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America, 461-474.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_19
- Vasconcelos, R.N., Santana, M.M., Costa, D.P., Duverger, S.G., Ferreira-Ferreira, J., Oliveira, M., Barbosa, L.S., Cordeiro, C.L., Rocha, W.J.S., 2025. Machine Learning Model Reveals Land Use and Climate's Role in Caatinga Wildfires: Present and Future Scenarios. *Fire* 8, 8. <https://doi.org/10.3390/fire8010008>
- Viana, S.A., Aguado, I., Martínez, S., 2017. Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain). *Environments* 4, 90.
<https://doi.org/10.3390/environments4040090>