

Focos de calor na América do Sul: evidências para o período de 2002 a 2018

Wesley Leitão de Sousa¹

wesleyleitao@gmail.com |  <https://orcid.org/0000-0002-9796-1531>

Guilherme Irffi¹

irffi@caen.ufc.br |  <https://orcid.org/0000-0002-3558-7628>

Resumo

O presente artigo discute os fatores relacionados à ocorrência dos focos de calor na América do Sul e na Amazônia Internacional a partir de um painel de dados por países, entre os anos de 2002 a 2018. Para tanto, realizou-se uma extensa revisão de literatura dos trabalhos empíricos desta área a fim de elaborar um modelo abrangente, contendo variáveis consideradas relevantes. As estimativas via modelo binomial negativo apontaram que a relação entre os focos de calor e o Produto Interno Bruto *per capita* ou entre focos de calor e Índice de Desenvolvimento Humano se dá na forma de “U-normal”, ou seja, estes indicadores podem acelerar a atividade dos focos de calor na região sul-americana. Ademais, a cobertura florestal e o desemprego induzem a atividade do fogo na América do Sul e no recorte dos países Amazônicos. A partir desses resultados, são sugeridas políticas públicas para o combate e a redução dos focos de calor no continente sul-americano.

Palavras-Chave

Atividade econômica; Floresta amazônica; Focos de calor; Incêndios florestais.

Fire hotspots and Wildfires in South America: evidence for the period from 2002 to 2018

Abstract

This article discusses the factors related to the occurrence of fire hotspots in South America and the International Amazon using country-level panel data ranging from 2002 to 2018. For this purpose, we perform an extensive literature review in order to elaborate a comprehensive model considering all relevant variables. We estimate a negative binomial model and the results indicate that the relationship between fire hotspots and Gross Domestic Product *per*

¹ Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil

Recebido: 04/08/2023.

Revisado: 02/02/2024.

Aceito: 15/03/2024.

Publicado: 28/06/2024.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1980-53575422wlg1>

capita or fire hotspots and the Human Development Index is in the form of a “U-shaped”, i.e., these indicators can accelerate the activity of fire hotspots in the South American region. Furthermore, forest cover and unemployment induce fire activity in South America and in the Amazonian countries. Based on these results, public policies are suggested to combat and reduce hot spots in the South American continent.

Keywords

Economic activity; Amazon rainforest; Fire hotspots; Wildfires.

JEL Classification

C23, O34, O50

1. Introdução

A transformação do debate sobre as queimadas na Amazônia e no Pantanal em um assunto internacional conduziu a novas reflexões sobre a atividade do fogo na América do Sul e nos países Amazônicos.¹ Conforme os dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE 2021), desde 1998 até 2020, foram observados 8,40 milhões de focos de calor na América do Sul, com 60,40% dessas ocorrências associadas ao Brasil,² enquanto os demais países amazônicos, individualmente, registram uma fração inferior a 10% do total observado.

Em 2020, foram 458 mil focos de calor na América do Sul, com a maioria desses (74%) relativos aos países Amazônicos (INPE 2021). Devido aos impactos globais dos focos de calor, incêndios e queimadas, e dada a complexidade e a interação de fatores antrópicos e naturais, este estudo testa a hipótese de que a ocorrência dos focos de calor na América do Sul e nos países Amazônicos é influenciada por uma combinação de fatores antrópicos e naturais.

Importante destacar que, dentre os aspectos naturais, estão a hidrologia, a meteorologia, a topografia e a vegetação (Andersen e Sugg 2019; Boubeta *et al.* 2019; Murthy *et al.* 2019), enquanto os antrópicos, isto é, associados às atividades humanas, reúnem a agropecuária, a demografia, a educação, a infraestrutura e os indicadores econômicos (Boubeta *et al.* 2015; Chen *et*

¹ Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela.

² 30% dos focos de calor foram registrados na Amazônia brasileira entre 1998 e 2020.

al. 2014; Guo *et al.* 2016a; Michetti e Pinar 2019; Prestemon *et al.* 2019; Su *et al.* 2019a; Vadrevu, Eaturu e Badarinath 2006).

Em face ao apresentado, o objetivo deste estudo consiste em identificar a relação entre os indicadores antrópicos e naturais e a ocorrência dos focos de calor na América do Sul e nos países Amazônicos para o período de 2002 a 2018. Para isto, será apresentada uma revisão de literatura dos trabalhos empíricos desta área, condensando e analisando as informações sobre o meio biofísico, o uso da terra, a demografia e a economia dos países sul-americanos.

Em outros termos, pode-se dizer que esta pesquisa se concentra nos pilares ambiental e econômico. No aspecto ambiental, as queimadas geram externalidades negativas que atingem os ecossistemas terrestres, inviabilizando os serviços relacionados à produção de alimentos, madeira e combustível; conservação e regulação da água; retenção de nutrientes; sequestro de carbono; proteção da biodiversidade; regulação climática; ecoturismo; valores espirituais e tradicionais (Aznar-Sánchez *et al.* 2018). Na esfera econômica, tais eventos podem incorrer em custos sociais. Na saúde, a fumaça das queimadas pode agravar doenças cardiovasculares e do aparelho respiratório, gerando custos econômicos. No mercado de trabalho, os danos se estendem às propriedades privadas e aos trabalhadores afetados pela atividade do fogo. Nos acordos comerciais, parcerias atuais e futuras entre países ou blocos econômicos podem ser afetadas, resultando ainda na imposição de barreiras comerciais à exportação de produtos.

A presente pesquisa contribui em relação aos trabalhos anteriores, pois integra os fatores antrópicos e naturais associados aos focos de calor, incêndios e queimadas, apresentando uma análise abrangente que atua como um recurso para pesquisadores e formuladores de políticas, destacando as consequências socioeconômicas e ambientais dos focos de calor por meio de modelo econométrico. Dentre os principais resultados do modelo Binomial Negativo para dados em painel, observa-se que indicadores de mercado de trabalho, atividade econômica (*PIBpc*) e desenvolvimento socioeconômico (*IDH*) intensificam os focos de calor na América do Sul e em países Amazônicos. A proporção da cobertura florestal amplia esse problema na região dos países Amazônicos, agindo como combustível para o fogo.

Ademais, o artigo segue estruturado em cinco seções, incluindo esta introdução. A próxima dedica-se a expor os aspectos naturais e as atividades humanas para a ocorrência dos focos de calor e incêndios. A fonte e descrição dos

dados, bem como o modelo empírico, são apresentadas na terceira seção. Em seguida, são expostos, discutidos e analisados os resultados. Por fim, são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2. Referencial Teórico

A atividade do fogo ocorre da combinação de fatores antrópicos e características biofísicas que potencializam ou suavizam a ocorrência dos focos de calor e queimadas. Assim, a síntese destes fatores inicia-se com o meio biofísico, que se conecta à ocorrência dos focos por meio da hidrologia, meteorologia, topografia e vegetação.

A relação entre o fogo e a hidrologia é investigada por meio da distância euclidiana dos dados georreferenciados dos focos de calor e corpos hídricos (Argañaraz *et al.* 2015; Song *et al.* 2017; Murthy *et al.* 2019). Neste ponto, Cardille *et al.* (2001) argumentam que os incêndios são menos propensos a queimar em curtas distâncias dos corpos d'água, devido ao ambiente úmido próximo a estes locais, propiciando uma região imprópria para incêndios. Desta forma, corpos hídricos são elementos que suavizam a ocorrência dos focos de calor.

Das condições meteorológicas, a ação dos ventos (Agee 1993; Costafreda-Aumedes *et al.* 2017), a baixa precipitação (Costafreda-Aumedes *et al.* 2017; Murthy *et al.* 2019; Su *et al.* 2019a), a baixa umidade relativa do ar (Prestemon *et al.* 2019; Xiao *et al.* 2015; Zhang e Lim 2019), as descargas elétricas (Mann *et al.* 2016) e as temperaturas média e máxima (Michetti e Pinar 2019; Murthy *et al.* 2019; Su *et al.* 2019a; Su *et al.* 2019b; Zhang e Lim 2019) favorecem os focos de calor e incêndios. Em sentido contrário, a temperatura mínima reduz esses eventos (Song *et al.* 2017).

Em relação à topografia, regiões de menor altitude (Guo *et al.* 2016a; Andersen e Sugg 2019) e com menor inclinação do terreno (Narayanaraj e Wimberly 2012; Oliveira *et al.* 2014) propiciam os focos e incêndios humanos. Entretanto, essas considerações dependem da origem dos pontos de ignição. González-Olabarria *et al.* (2015) ratificam que incêndios associados à queima das pastagens e às atividades florestais são localizados em regiões montanhosas. Por outro lado, incêndios criminosos (Vasconcelos *et al.* 2001) ou causados por negligência (Juan *et al.* 2012; Serra *et al.* 2013) ocorrem com mais frequência em declives planos ou moderados.

A vegetação tem relação direta com os focos de calor por causas antrópicas e naturais (Andersen e Sugg 2019; Elia *et al.* 2019; Prestemon *et al.* 2019). Andersen e Sugg (2019) argumentam que as florestas proveem combustível para os incêndios, o que se opõe às regiões desenvolvidas que dispõem de menos material inflamável. Os campos, caracterizados pela presença de herbáceas, gramíneas e pequenos arbustos, são amplamente relacionados com a geração dos focos de calor e incêndios (Boubeta *et al.* 2019; Elia *et al.* 2019).

A conexão entre o uso da terra e os incêndios florestais capta as ações antrópicas (Boubeta *et al.* 2015; Elia *et al.* 2019; Martínez-Fernández, Chuvieco e Koutsias 2013; Fonseca-Morello *et al.* 2020; Oliveira *et al.* 2012). Na agricultura, as queimadas intencionais são empregadas no gerenciamento e na restauração das pastagens, práticas de pousio, e em conflitos criminosos ou atos de vandalismo. Por outro lado, os incêndios não intencionais são originados das atividades agrícolas descuidadas (Martínez-Fernández, Chuvieco e Koutsias 2013; Fonseca-Morello *et al.* 2020).

Na pecuária, a atividade do fogo é crucial para a ampliação do pasto para o rebanho animal (Boubeta *et al.* 2015; Fonseca-Morello *et al.* 2020; Oliveira *et al.* 2012). Além desses usos da terra, citam-se as propriedades rurais, nas quais um maior número de estabelecimentos agrícolas e de suas partições elevam os riscos atrelados à ignição dos incêndios (Martínez-Fernández, Chuvieco e Koutsias 2013). Comenta-se ainda a contribuição de máquinas e utensílios agrícolas, identificada na literatura como *proxy* para intensidade do uso da terra (Martínez-Fernández, Chuvieco e Koutsias 2013; Rodrigues, de la Riva e Fotheringham 2014).

Dentre os indicadores demográficos, a densidade populacional é relacionada à ocorrência dos focos de calor (Alcasena *et al.* 2016; Catry *et al.* 2009; Nunes *et al.* 2016; Prestemon *et al.* 2019) e a um maior número de queimadas intencionais (Prestemon *et al.* 2019). O resultado não é consensual. Argañaraz *et al.* (2015) e Guo *et al.* (2016b) encontraram baixa frequência ou associação negativa com focos e incêndios. Para tal fato, Guo *et al.* (2016b) explicam que a relação contrária é oriunda das grandes massas populacionais em cidades ou em áreas desenvolvidas com atividade industrial, baixa cobertura florestal e com menor percentual da população dedicada às atividades florestais.

A extensão (*km*) ou densidade (*km/km²*) das estradas (Murthy *et al.* 2019; Song *et al.* 2017) e ferrovias (Su *et al.* 2019a) são fatores de acessibilidade a incêndios e queimadas, logo, uma maior malha rodoviária e ferroviária são

associadas à ocorrência dos focos de calor. Em termos espaciais, há uma associação negativa entre localização georreferenciada dos focos de calor e distância para as margens das estradas (Catry *et al.* 2009; Zhang *et al.* 2016) e ferrovias (Sturtevant e Cleland 2007; Zhang *et al.* 2016).

Em termos educacionais, um maior percentual da população entre 25 e 64 anos com ensino superior reduziu as áreas de queimadas e focos de calor na Itália (Michetti e Pinar 2019). Para Vadrevu, Eaturu e Badarinath (2006), maiores taxas de alfabetização estão associadas a uma menor ocorrência dos focos de calor no estado de *Andhra Pradesh* (Índia), ou seja, com níveis mais elevados de capital humano, os recursos naturais escassos, como as florestas, são protegidos. Em relação ao comportamento socioeconômico, Prestemon *et al.* (2019) observaram que uma maior quantidade de prisões reduz significativamente futuros incêndios ilegais e intencionais.

Para Chen *et al.* (2014), o nível de emprego reduz os riscos dos focos de calor e incêndios, pois a população empregada tem elevado custo de oportunidade e menor probabilidade de cometer atos criminosos. Já o nível de desemprego é positivamente relacionado aos focos, pois a variável é uma *proxy* para momentos de recessão econômica e pobreza, problemas socioeconômicos que reverberam em um aumento dos conflitos que resultam em incêndios deliberados (Oliveira *et al.* 2012; Nunes *et al.* 2016).

Dados econômicos e de degradação ambiental são avaliados pela Curva de Kuznets Ambiental (CKA),³ a partir da estratégia para captar linearidades entre indicadores econômicos e ambientais. A literatura empírica não apresenta consenso sobre esta relação, principalmente, em função da complexidade econômica dos países, dado que os resultados podem ser positivos (Fonseca-Morello *et al.* 2020; Su *et al.* 2019b) ou negativos (Guo *et al.* 2016a, 2016b), a depender da especialização produtiva dos mesmos.

Quanto ao setor primário da economia, Tasker e Arima (2016) e Rappaport *et al.* (2018) argumentam que a exportação de madeira é uma *proxy* para o nível de extração, que por sua vez podem se relacionar com os incêndios, dado que a transição na interface florestal-agrícola ocorre após a captação do recurso. Fonseca-Morello *et al.* (2020) acrescentam que a relação positiva entre a degradação florestal e os incêndios é também esperada para a extração de madeira.

³ Desenvolvida por Grossman e Krueger (1995) a partir da pesquisa de Kuznets (1955), a hipótese da CKA é de que para níveis baixos de desenvolvimento, o crescimento da renda per capita eleva a degradação ambiental, porém a partir de certo nível de renda, o processo se reverteria, com o aumento da renda levando à redução da degradação ambiental, processo descrito na literatura como “U-invertido”.

Por entender que existem diversas fontes naturais e humanas para a propagação do fogo, são identificadas, a partir deste referencial teórico, 26 fatores que podem (ou não) contribuir para a incidência de focos de calor e queimadas. Observe, pelo Quadro 1, que elas estão distribuídas entre o meio biofísico (12), o uso da terra (4), a demografia (6) e a economia (4). Dessa forma, 10 variáveis reduzem os focos de calor, enquanto outras 15 potencializam seus efeitos, haja vista que o efeito do *PIBpc* dependerá do setor econômico mais participativo nos países analisados.

Quadro 1 - Lista e comportamento esperado das variáveis na ocorrência dos focos de calor.

Meio Biofísico	Uso da Terra	Demografia	Economia
Altitude/Declividade (-) Campos/Florestas (+) Descargas elétricas (+) Dist. corpos d'água (+) Precipitação (-) Tem. máxima/média (+) Tem. mínima (-) Umidade relativa (-) Vel. dos ventos (+)	Agricultura/Pecuária (+) Máquinas agrícolas (+) Prop. agrícolas (+)	Den. populacional (+) Den. estradas e ferrovias (+) Dis. estradas e ferrovias (-) Prisões (-) Alfabetização (-) Pop. entre 25 e 64 anos com ensino superior (-)	Comércio da madeira (+) Desemprego (+) Emprego (-) <i>PIBpc</i> (?)

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

3. Metodologia

3.1. Área de Estudo

Segundo dados da *Food And Agriculture Organization Of The United Nations* (FAO 2020), a área de estudo tem 17,36 milhões de *km*² e abrange dez dos treze países⁴ da América do Sul, e um subgrupo de nações que integram os países Amazônicos⁵ (Figura 1). Deste total, 32,60% são destinadas às práticas agrícolas, em referência ao ano de 2018.

⁴ Guiana, Guiana Francesa e Suriname foram excluídos em face à disponibilidade da base de dados.
⁵ Na legenda, os países Amazônicos não refletem a extensão territorial da floresta Amazônica, e sim das nações que possuem domínios desse bioma.



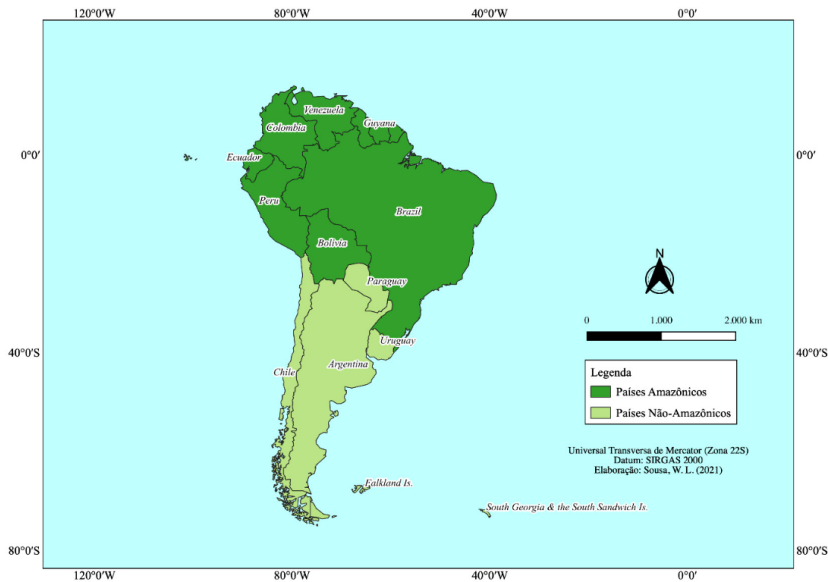


Figura 1 - América do Sul: países Amazônicos e não-Amazônicos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A diversidade dos biomas na região é enorme. Somente em sua porção central, coexistem Cerrado, Chaco, Floresta Atlântica Semidecidual e Pantanal (Rezende *et al.* 2020). Além desses, incluem-se os biomas de Água Doce (Dodds *et al.* 2019), a Caatinga (Oliveira *et al.* 2020), os Pampas (Beneduzi *et al.* 2019) e o Amazônico.

A análise dos ciclos anuais de pluviometria permite a classificação em oito regimes de precipitação, com a estação chuvosa na América do Sul ocorrendo durante o verão e a estação seca ocorrendo no inverno (Reboita *et al.* 2015). A estimativa populacional é de 422,04 milhões de habitantes, com 71,9% deste total concentrados na Argentina, no Brasil e na Colômbia. Em termos de densidade, os maiores valores ($> 30 \text{ hab/km}^2$) são encontrados na Colômbia, no Equador e na Venezuela, dados concernentes ao ano de 2018 (The World Bank 2020).

3.2. *Focos de Calor*

A série histórica dos focos de calor para a América do Sul é proveniente do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite AQUA,⁶ com dados pré-processados e disponibilizados por meio do Programa Queimadas (INPE 2021). O período de análise é de 16 anos, e inclui a contagem dos focos de calor desde janeiro de 2002 até dezembro de 2018. Embora o monitoramento parcial da atividade dos focos de calor tenha iniciado em 1998, o ano de 2002 foi escolhido para o início da análise, pois foi quando todos os países realizaram o mapeamento dos pontos de ignição de maneira integral.

3.3. *Fatores Antrópicos e Naturais*

Para selecionar as variáveis relevantes na ocorrência dos focos de calor, utiliza-se do referencial teórico e das informações disponíveis para os países sul-americanos no período de 2002 a 2018. Dados do meio biofísico e uso da terra são extraídos da FAO (2020). Para o meio biofísico, extraíram-se a proporção (%) do tamanho dos corpos hídricos continentais (*ÁGUA*) em relação à área dos países, o percentual da área dos países coberta por florestas (*FLORE*) e a mudança anual da temperatura⁷ (*TEMP*) em °C. No uso da terra, identificaram-se o percentual da área dos países destinada às atividades agrícolas (*AGRI*)⁸ e a densidade da pecuária⁹ (*AGRO*) em termos do número de cabeças de animais por km^2 .

Do *The World Bank* (2020), obteve-se a estimativa para a densidade populacional (*DPOP*), na razão nº de habitantes/ km^2 . Indicadores do mercado de trabalho, como o percentual da população empregada (*EMP*) e desempregada (*DES*), foram obtidos da *International Labour Organization* (ILO 2020). Na atividade econômica, utilizou-se o logaritmo natural do *PIBpc*,¹⁰ do *International Monetary Fund* (IMF 2020).

⁶ Conforme a Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA 2020), o AQUA é um satélite americano lançado em 2002, em parceria com Brasil e Japão. Sua missão faz parte do *Earth Observation System*, programa fundado pela NASA *Earth Enterprise*, e leva a bordo seis instrumentos sensores. Um deles, o sensor MODIS, permite a medição de propriedades das nuvens, do fluxo de energia radiante e de focos de calor, além de estudos sobre o uso e a cobertura da terra e atividades vulcânicas, entre outros.

⁷ Mudança de temperatura média anual em relação ao período base de 1951-1980.

⁸ Terras agricultáveis na forma de lavouras e pastagens permanentes.

⁹ Rebanho total de asininos, bodes, bovinos, búfalos, cavalos, mulas e ovelhas.

¹⁰ *PIBpc* dos países com base na Paridade do Poder de Compra (PPC), a preços constantes, em US\$ de 2011.

3.4. Estratégia Empírica

A relação entre a ocorrência anual dos focos de calor e as características geosocioeconômicas é capturada por um modelo de dados em painel:

$$Focos_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBpc_{i,t-1}) + \beta_2 [\ln(PIBpc_{i,t-1})]^2 + X_{i,t-1}\beta + u_{i,t} \quad (1)$$

$$u_{i,t} = \mu_i + v_{i,t} \quad (2)$$

Onde $Focos_{i,t}$ é a contagem dos focos ativos de calor no i -ésimo país ($i = 1, \dots, 10$) no ano t ($t = 2002, \dots, 2018$), $\ln(PIBpc_{i,t-1})$, é o logaritmo natural do PIBpc para o ano anterior, e $X_{i,t-1}$ correspondem às demais variáveis explicativas defasadas em um ano,¹¹ que captam a relação entre aspectos naturais, antrópicos e focos de calor. O componente de erro do modelo (1) captura fatores não observados, sendo dividido em dois elementos (Baltagi 2005): i) o μ_i representa a heterogeneidade não observada em cada país constante ao longo do tempo, ii) enquanto $v_{i,t}$ é o componente de erro idiossincrático para cada país i no ano t .

Além do $\ln(PIBpc_{i,t-1})$, foi adicionada a forma quadrática $[\ln(PIBpc_{i,t-1})]^2$ para testar a hipótese da CKA, uma teoria de que a atividade econômica por si só garante a proteção ambiental e o uso sustentável dos recursos naturais. Neste sentido, a literatura descreve (Grossman e Krueger 1991, 1995) que indicadores de degradação/poluição ambiental apresentam trajetória de “U-invertido” à medida que a renda *per capita* aumenta. Isso significa que os focos de calor aumentam até o ponto de inflexão, após o qual começam a diminuir. Tal padrão indica que, em um primeiro momento, a atividade econômica pode levar a um aumento nos focos de calor, mas à medida que a renda *per capita* aumenta, a preocupação e o investimento em práticas sustentáveis também aumentam, levando a uma diminuição dos focos de calor. Em tal caso, é suficiente que $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ (concavidade para baixo), já para o formato de “U-normal”, $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ (concavidade para cima).

Como os focos de calor são estimados modelos Binomiais Negativos para dados em painel (1) (Cameron e Trivedi 2009; Hausman *et al.* 1984; Wooldridge 2010). Na seleção do modelo, aplicou-se o teste de Hausman ao estimador de efeitos aleatórios (3) e de efeitos fixos (5). Na hipótese nula do teste, os estimadores de efeitos fixos e de efeitos aleatórios não

¹¹ Implica que as variáveis explicativas têm efeito causal posterior na variável explicada.

divergem. Caso não seja possível aceitar a hipótese nula, é apropriado utilizar o modelo de efeitos fixos (Pindyck e Rubinfeld 1997).

Modelos Binomiais Negativos com Efeitos Aleatórios (*Negative Binomial Random Effects* – NBRE):

$$Y_{i,t} = \frac{\mu_i \exp(\beta' X_{i,t})}{\varphi_i + v_{i,t}} \quad (3)$$

$$Y_{i,t} = \frac{\mu_i \exp(\beta' X_{i,t})}{\varphi_i + v_{i,t}} \quad (4)$$

Modelos Binomiais Negativos com Efeitos Fixos (*Negative Binomial Fixed Effects* – NBFÉ):

$$Y_{i,t} = \frac{\exp(\beta' X_{i,t})}{\delta} + v_{i,t} \quad (5)$$

$$V[Y_{i,t}|X] = \frac{\exp(\beta' X_{i,t})(1 + \delta)}{\delta^2} \quad (6)$$

4. Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados são apresentados e discutidos em três subseções que contemplam as estatísticas descritivas, em seguida, as estimativas dos modelos empíricos para a América do Sul e os países Amazônicos, e por último, discute-se a importância e consistência desses resultados.

4.1. Análise Descritiva dos Dados

A contagem dos pontos de ignição inclui 6,90 milhões de focos de calor no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2018. A Figura 2 apresenta a evolução desses registros, na cor amarela para a América do Sul e na cor laranja para os países Amazônicos, que reúnem 82% da atividade do fogo. Observe que na década de 2000, a partir de 2002 até 2008, estão concentrados os maiores dos focos de calor na América do Sul, cerca de 52,40% do total.

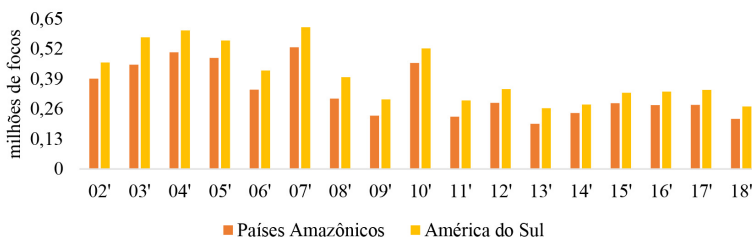


Figura 2 - Evolução dos focos na América do Sul e nos países Amazônicos, 2002 a 2018.

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

Na Figura 3, a análise mensal do acumulado dos focos de calor entre janeiro e maio (estação chuvosa) revela que os focos de queimadas se mantêm praticamente estáveis, com pouca oscilação. Já nos meses de junho e julho, é possível notar um aumento gradual da atividade do fogo. Em ritmo de crescimento, na estação seca, o bimestre agosto e setembro reuniram os maiores quantitativos dos focos de calor na América do Sul e nos países Amazônicos.

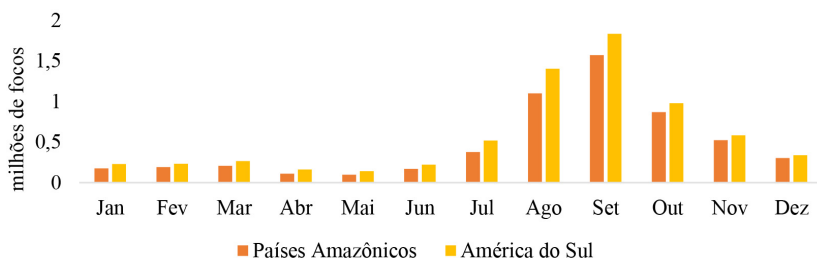


Figura 3 - Acumulado mensal dos focos de calor na América do Sul e nos países Amazônicos.

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

Na distribuição espaço-temporal, Vega-Nieva *et al.* (2019) interpretam que um resultado superior a dois focos de calor a cada 100 km^2 é classificado como alta incidência desses eventos. A Figura 4 apresenta a média anual dos focos de calor/ 100 km^2 entre 2002 e 2018. Visualmente, Bolívia, Brasil, Paraguai e Venezuela têm alta incidência dos focos de calor. Desses, o Paraguai tem a maior densidade, com $6,20 \text{ focos}/100 \text{ km}^2$, fato explicado, pois o país possui um dos maiores períodos de estação de queimadas do planeta, quando essas se estendem acima dos sete meses (Ferreira *et al.* 2020).

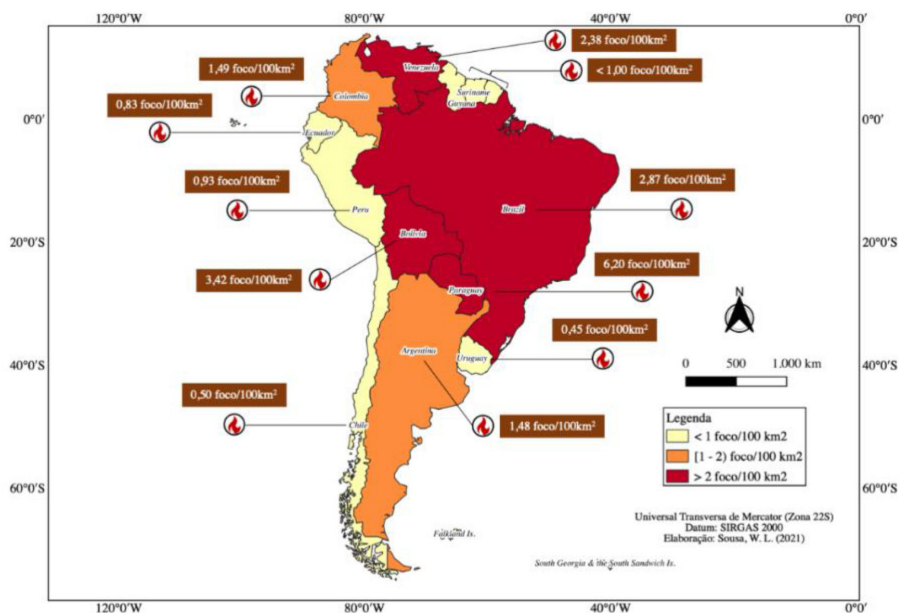


Figura 4 - Densidade média anual dos focos ativos de calor entre 2002 e 2018.

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

A análise das covariadas é detalhada na Tabela 2, destacando médias, desvios-padrão, valores mínimos e máximos dos dados. As práticas agrícolas têm cobertura média de 36,30%, com o Peru registrando o menor percentual da área destinada à agricultura. Em relação à lotação da pecuária, representada pela variável AGRO, a média foi de 14,93 cabeças de animais por km^2 , sendo o Uruguai o país sul-americano com as maiores taxas de lotação.

Para o meio biofísico, a média da proporção dos corpos hídricos continentais pela área dos países é de 1,64%, com máxima cobertura no Chile (3,65%) e cobertura mínima no Paraguai (0,88%). Na cobertura florestal por países,¹² a média é de 42,27%, com o Brasil possuindo as mais altas taxas de cobertura em todos os períodos analisados. Quanto à mudança anual de temperatura, os valores oscilam entre $-0,28^{\circ}C$ e $1,62^{\circ}C$, com média de $0,67^{\circ}C$.

¹² Percentual da cobertura florestal dos países para 2018 (valores entre parênteses): Argentina (10,35%), Bolívia (46,70%), Brasil (58,66%), Chile (23,73%), Colômbia (52,27%), Equador (44,53%), Paraguai (40,96%), Peru (56,56%), Uruguai (11,27%) e Venezuela (50,64%).

A densidade populacional média é de 26,06 habitantes por km^2 , variando de 8,21 a 68,51. Quanto aos indicadores do mercado de trabalho, a média percentual da população empregada é de 61,21%, com o Peru destacando-se com a maior proporção empregada em quase todos os períodos. O desemprego apresentou uma média de 7,09% e um desvio-padrão de 3,46%. O *PIBpc* médio foi de US\$ 8122, alcançando valor máximo em 2018 para o Uruguai (US\$ 17423) e mínimo na Bolívia (US\$ 3291) no mesmo ano. A matriz de correlação é apresentada no Apêndice, a partir da qual se observa uma alta correlação significativa ($r = 0,91$) entre *AGRI* e *AGRO*. Em função disso, optou-se por considerar apenas o *AGRO* no modelo econométrico.

Tabela 2 - Estatísticas Descritivas dos Focos de Calor e das Variáveis Explicativas, América do Sul, 2002 – 2018.

Variáveis	Média	Desvio-Padrão	Mínimo	Máximo
<i>FOCOS</i>	40626,82	75160,84	256	393915
<i>AGRI</i>	36,30	17,77	18,38	85,29
<i>AGRO</i>	14,93	12,24	2,53	50,27
<i>ÁGUA</i>	1,64	0,79	0,88	3,65
<i>FLORE</i>	42,27	18,88	8,24	64,99
<i>TEMP</i>	0,67	0,33	-0,28	1,62
<i>DPOP</i>	26,06	14,39	8,21	68,51
<i>EMP</i>	61,21	6,67	48,39	76,89
<i>DES</i>	7,09	3,46	2,02	19,59
<i>PIBpc</i>	8121,99	4120,30	2066	17423

Fonte: elaborada com base nos dados da pesquisa.

4.2. Análise dos Resultados: América do Sul e Países Amazônicos

De acordo com o resultado do teste de Hausman, Tabela 3, a análise e a discussão devem ocorrer com base nos modelos Binomiais Negativos com efeitos aleatórios. Desse modo, para a América do Sul, a avaliação dos resultados deve ser feita com base nos parâmetros do modelo NBRE (1).

Em relação ao mercado de trabalho, o percentual das pessoas empregadas eleva os focos de calor na América do Sul, o que não está de acordo com a literatura científica (Chen *et al.* 2014). Ao observar as estatísticas da ILO (2020), conclui-se que boa parte dos empregos na América do Sul é no setor de serviços, seguido do setor industrial, acompanhado dos empregos na agricultura, o que estimula o debate para novas pesquisas que relacionam a ocupação em diferentes setores da economia à ocorrência dos focos de calor.

O percentual das pessoas desempregadas no ano anterior influencia a ocorrência dos focos de calor na América do Sul. O resultado está de acordo com o obtido por Oliveira *et al.* (2012) e Nunes *et al.* (2016), pois o nível de desemprego denota momentos de recessão econômica e pobreza, problemas que ocasionam um aumento dos conflitos que resultam em incêndios deliberados.

Para a atividade econômica, a CKA apresentou formato de “U-normal”, implicando que a redução dos focos, quando a atividade econômica cresce, é transitória, pois à medida que o *PIBpc* cresce, o número de focos de calor se eleva. O ponto de inflexão da CKA para os países da América do Sul é com *PIBpc* de aproximadamente US\$ 9415, valor superior à média da amostra, com US\$ 8122. Assim, Argentina, Chile e Uruguai situam-se na região ascendente da CKA ($PIBpc \geq \text{US\$ } 9415$), indicando um *trade-off* entre a atividade econômica e os focos, pois à medida que a renda pc cresce, a ocorrência dos focos segue a mesma tendência. Por outro lado, o restante dos países situa-se na fase descendente da curva ($PIBpc < \text{US\$ } 9415$), onde incrementos na atividade econômica são acompanhados por um decréscimo dos focos de calor.

Tabela 3 - Resultados dos Focos de Calor para a América do Sul e os Países Amazônicos via *PIBpc*.

Covariadas	Modelos			
	América do Sul		Países Amazônicos	
	<i>NBRE (1)</i>	<i>NBFE (2)</i>	<i>NBRE (3)</i>	<i>NBFE (4)</i>
<i>ÁGUA</i>	0,2802 (0,0188)	0,3853 (0,2343)	0,5062 (1,0523)	0,5167 (1,1084)
<i>FLORE</i>	0,0057 (0,0006)	0,0042 (0,0106)	0,1278* (0,0238)	0,1145* (0,0260)
<i>TEMP</i>	-0,0982 (0,0019)	-0,0921 (0,0860)	-0,0697 (0,0975)	-0,0570 (0,1249)
<i>AGRO</i>	-0,0194 (0,0004)	-0,0161 (0,0108)	-0,0179 (0,0250)	-0,0197 (0,0360)
<i>DPOP</i>	0,0075 (0,0007)	0,01033 (0,0072)	0,0150 (0,0098)	0,0190 (0,0101)
<i>EMP</i>	0,0286* (0,0011)	0,03098* (0,0126)	0,0231* (0,0385)	0,0231 (0,0174)
<i>DES</i>	0,0744* (0,0002)	0,0743* (0,0159)	0,0531* (0,0120)	0,0411 (0,0221)
$\ln(PIBpc)$	-5,6658* (0,2333)	-5,6270* (2,7056)	-4,5302* (4,7500)	-4,5152 (4,7400)
$[\ln(PIBpc)]^2$	0,3096* (0,0290)	0,3037* (0,1540)	0,2574* (0,2845)	0,2413 (0,2759)
<i>Intercepto</i>	25,4824* (0,7577)	25,2309 (11,9958)	14,3625* (20,5298)	14,5077 (20,1398)
<i>Wald chi2</i>	52,96*	50,50*	46,23*	45,84*
<i>Log likelihood</i>	-1581,82	-1439,49	-901,23	-896,65
<i>Teste Hausman</i>	3,04	---	5,03	
Nº Obs		160		96

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

Notas: Erros-padrão entre parênteses. Nível de significância: * < 0,05.

No recorte dos países Amazônicos, a análise para o modelo NBRE (3) reforça os resultados vistos para a amostra completa. O formato da CKA expressa que na fase descendente, com *PIB_{pc}* inferior a US\$ 6637 ocorre redução dos focos de calor à medida que o *PIB_{pc}* aumenta; já na fase ascendente da curva, com *PIB_{pc}* superior a US\$ 6637 acontece dos focos de calor aumentarem seguido da elevação do *PIB_{pc}*. Na distribuição por países, Bolívia, Colômbia, Equador, Paraguai e Peru estão na região descendente, e os demais, na fase ascendente.

4.3. *Discussões e Implicações dos Focos de Calor*

A prevenção e a mitigação dos efeitos do fogo são uma questão complexa para a elaboração das políticas ambientais de combate a incêndios, pois a variabilidade espacial dos focos de calor, em conjunto aos fatores humanos e naturais, dificulta a eficácia dessas medidas.

Da relação entre causas humanas e focos de calor, conclui-se que o desemprego eleva a ocorrência dos focos de calor na América do Sul. Logo, as instituições governamentais devem considerar as ações de combate aos focos de calor em áreas com alto nível de desemprego e com predileção às regiões florestais. Em termos de países, devem-se priorizar esforços na Argentina, no Brasil e na Colômbia, nações cujo percentual de pessoas desempregadas é superior a 9% (ILO 2020).

O efeito do *PIB_{pc}* sobre a ocorrência dos focos de calor é comumente avaliado na literatura em sua forma linear. Logo, é natural que alguns estudos obtenham associação positiva ou negativa entre as duas variáveis (Guo *et al.* 2016a, 2016b; Fonseca-Morello *et al.* 2020; Su *et al.* 2019b). Nesta pesquisa, testou-se a teoria da CKA entre a atividade econômica e os pontos de ignição, ou seja, se o *PIB_{pc}* garantia por si só uma redução do quantitativo dos focos de calor à medida que estas nações se desenvolviam economicamente.

No resultado preliminar da Tabela 3, conclui-se que a teoria da CKA para a América do Sul é violada. Para o formato de “U-normal”, pode ocorrer que, no primeiro estágio, as atividades econômicas não estejam intrinsecamente associadas aos focos de calor/incêndios ou que a sociedade tenha precaução com o meio ambiente. Na medida em que as economias crescem, a população deseja maiores níveis de renda, porém sem cuidado com o meio ambiente.

Como o *PIBpc* é uma medida que leva em consideração apenas o aspecto da renda, é adequado avaliar a consistência desses resultados por uma variável mais ampla de desenvolvimento, o *IDH*,¹³ que contempla as dimensões de educação, renda e saúde (UNDP 2020). As estimativas são reapresentadas na Tabela 4 para a América do Sul e os países Amazônicos. Conforme o teste de Hausman, os modelos Binomiais Negativos com efeitos aleatórios são os mais adequados para a análise, NBRE (5) e NBRE (7). Portanto, reforça-se os efeitos vistos no modelo inicial, NBRE (1), o efeito positivo do desemprego sobre a ocorrência dos focos de calor na região sul-americana e a impossibilidade de sustentação teórica da forma de “U-invertido” da CKA.

Para o modelo NBRE (5), o ponto de inflexão é com *IDH* de 0,780, valor ligeiramente inferior à média do *IDH* dos países da amostra, com 0,744. Na fase descendente da CKA ($IDH < 0,780$), encontram-se a Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Paraguai, Peru e Venezuela, países em que uma melhora no *IDH* é seguida por um decréscimo dos focos de calor. Por outro lado, Argentina, Chile e Uruguai encontram-se na região ascendente ($IDH \geq 0,780$), indicando que o desenvolvimento humano pode acelerar os focos de calor.

No recorte dos países Amazônicos, o ponto de inflexão é com *IDH* de 0,730, valor ligeiramente inferior ao ponto de virada obtido no modelo anterior, de 0,760. Nessa nova delimitação, o único país na fase descendente da CKA ($IDH < 0,730$) para focos de calor é a Bolívia. Destaca-se que o país tem *IDH* de 0,714 para o ano de 2018 (UNPD 2020), logo, em curto prazo, espera-se que a Bolívia ultrapasse o ponto de inflexão estipulado.

¹³ Elaborado por Mahbub ul Haq e Amartya Sen, economista ganhador do Prêmio Nobel de Economia em 1998.

Tabela 4 - Resultados dos Focos de Calor para a América do Sul e os Países Amazônicos via IDH.

	Modelos			
	América do Sul		Países Amazônicos	
Covariadas	NBRE (5)	NBFE (6)	NBRE (7)	NBFE (8)
ÁGUA	0,3262 (0,2021)	0,4036* (0,2044)	0,2465 (0,8828)	0,0932 (0,8862)
FLORE	0,0038 (0,0108)	0,0015 (0,0109)	0,0997* (0,0297)	0,0983* (0,0307)
TEMP	-0,0643 (0,0896)	-0,0617 (0,0888)	-0,0806 (0,1327)	-0,0786 (0,1321)
AGRO	-0,0173 (0,0094)	-0,0157 (0,0096)	0,0037 (0,0359)	0,0059 (0,0363)
DPOP	0,0097 (0,0073)	0,0125 (0,0073)	0,0085 (0,0102)	0,0134 (0,0097)
EMP	0,0254* (0,0122)	0,0269* (0,0123)	0,0218* (0,0172)	0,0240 (0,0171)
DES	0,0583* (0,0158)	0,0583* (0,0159)	0,0342* (0,0199)	0,0351 (0,0200)
IDH	-46,6490* (13,0101)	-47,2790* (12,9385)	-94,1392* (34,6762)	-91,6697* (35,4657)
IDH ²	29,5249* (8,8679)	29,7134* (8,7833)	64,1167* (24,2603)	62,2169* (24,7883)
Intercepto	18,2349* (4,8571)	18,3813* (4,8755)	29,4460* (12,1802)	28,6102* (12,4615)
Wald chi2	72,36*	69,56*	51,68*	49,45*
Log likelihood	-1575,93	-1433,43	-981,25	-894,32
Teste Hausman	0,34	---	0,36	---
Nº Obs		160		96

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

Notas: Erros-padrão entre parênteses. Nível de significância: * < 0,05.

No meio biofísico, a variável *FLORE* é peça fundamental na análise dos riscos associados à atividade do fogo. Portanto, em países Amazônicos, o aumento na proporção das florestas no ano anterior possibilita a ocorrência dos focos de calor, e isso se deve, possivelmente, à combinação da atividade humana (como agricultura, desmatamento, mineração, queima de resíduos) e descargas elétricas que incidem nessas regiões, bem como períodos prolongados de estiagem, que propiciam a vegetação seca, combustível para o fogo.

No que concerne ao bioma Amazônico, apesar de ser intrinsecamente caracterizado como uma floresta tropical úmida, a porção brasileira desta região destaca-se como uma das áreas com maior incidência dos focos de calor, conforme evidenciado pelos dados fornecidos pelo Programa Queimadas. A situação é tal que, no período de 2002 a 2018, o bioma Amazônico registrou números recordes de detecções dos focos de calor, com exceção dos anos de 2011 e 2012, quando o cerrado superou o referido bioma (INPE 2021). Dada a natureza úmida local, é possível que uma interação de fatores entre desmatamento, degradação ambiental e até as mudanças climáticas possa potencializar a ocorrência de focos e queimadas na região.

O resultado é, portanto, similar aos obtidos por Prestemon *et al.* (2019) para Galícia (Espanha) entre 1999 e 2014, e por Andersen e Sugg (2019) para a região oeste do estado da Carolina do Norte (Estados Unidos) entre os anos de 1985 e 2016. Esse achado é particularmente relevante, pois o bioma Amazônico percorre oito países sul-americanos e, além da biomassa vegetal, nas florestas preservadas em boas condições, os danos para os incêndios florestais tendem a serem maiores.

Apesar da variável relacionada à mudança anual de temperatura não ter sido significativa nas duas análises, vale destacar o papel de alguns fenômenos climáticos na região. Para White (2018), as variações anuais na ocorrência dos incêndios florestais na América Sul podem estar atreladas às alterações climáticas decorrentes do El Niño e da La Niña. Enquanto o El Niño modifica os regimes de precipitação e amplifica a aridez em determinados locais, a La Niña, por sua vez, resulta em aumento no regime de chuvas em algumas regiões do continente.

Por fim, os principais resultados dessa pesquisa foram condensados no Quadro 2 a seguir. A análise via *PIBpc* ou *IDH* para a América do Sul apresenta que o grupo de países por regiões da CKA é homogêneo: Argentina, Chile e Uruguai têm papel crescente nos focos de calor e, por isso, devem adotar medidas para combater e suavizar a ocorrência desses eventos. Ademais, para os países Amazônicos, os grupos de países por regiões da curva são heterogêneos, porém existe uma certa consistência dos países avaliados pelo *PIBpc* e os da amostra completa.

Quadro 2 - Resumo da CKA aplicada aos focos de calor.

Região	Variável	Hipótese da CKA	Ponto de Inflexão	Região Ascendente
América do Sul	<i>PIBpc</i>	Violada ("U-normal")	US\$ 9415 pc	Argentina, Chile e Uruguai
	<i>IDH</i>	Violada ("U-normal")	0,780	Argentina, Chile e Uruguai
Países Amazônicos	<i>PIBpc</i>	Violada ("U-normal")	US\$ 6634 pc	Argentina, Chile, Equador, Uruguai, Venezuela
	<i>IDH</i>	Violada ("U-normal")	0,730	Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Paraguai, Peru, Uruguai e Venezuela

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

5. Conclusões

A dinâmica do fogo resulta da interação entre fatores antropogênicos e naturais. Nesse contexto, parte-se da hipótese de que a ocorrência dos focos de calor na América do Sul e nos países Amazônicos é influenciada pela combinação desses elementos. Assim, o objetivo deste estudo foi identificar, no período de 2002 a 2018, os principais indicadores associados a esses eventos.

Dentre os achados, as variáveis do mercado de trabalho são um dos principais indicadores antrópicos associados aos focos na América do Sul e nos países Amazônicos. Para o *PIBpc* e o *IDH*, viola-se a hipótese da CKA, o formato de “U-normal” implica que os focos retornam a crescer na América do Sul a partir de US\$ 9415 ou com *IDH* acima de 0,780. Nos aspectos naturais, a importância da proporção das florestas nos países Amazônicos levanta questões sobre a influência das atividades humanas nessas regiões.

Com base nos resultados, algumas ações poderiam atenuar o problema dos focos de calor na América do Sul e nos países Amazônicos. A priorização de políticas de emprego em regiões com alto desemprego e a promoção da cooperação governamental intra e interpaíses. O monitoramento em tempo real, pode ainda prevenir grandes incêndios, o que reduz os impactos ambientais, econômicos e na saúde.

O estudo amplia a discussão dos condicionantes dos focos na América do Sul a partir de evidências humanas e naturais. Entretanto, diante da complexidade do tema, há necessidade de novas pesquisas, as quais podem

abordar a setorialização do emprego por atividades econômicas (agricultura, indústria e serviços), com o intuito de verificar os setores que mais contribuem ou atenuam com a ocorrência desses eventos. Entre as limitações da pesquisa, constata-se a baixa cobertura ou ausência de informações sobre variáveis adicionais que poderiam aprimorar a análise.

Referências

- Agee, James K. 1995. *Fire ecology of pacific northwest forests*. Washington, DC, USA: Island Press.
- Alcasena, Fermín J., Michele Salis, Nicholas J. Nauslar, A. Eduardo Aguinaga, e Cristina Vega-García. 2016. "Quantifying Economic Losses from Wildfires in Black Pine Afforestations of Northern Spain". *Forest Policy and Economics* 73: 153–67.
- Andersen, Lauren M., e Margaret M. Sugg. 2019. "Geographic Multi-Criteria Evaluation and Validation: A Case Study of Wildfire Vulnerability in Western North Carolina, USA Following the 2016 Wildfires". *International Journal of Disaster Risk Reduction: IJDRR* 39 (101123): 101123.
- Argañaraz, Juan P., Gregorio Gavier Pizarro, Marcelo Zak, Marcos A. Landi, e Laura M. Bellis. 2015. "Human and Biophysical Drivers of Fires in Semiarid Chaco Mountains of Central Argentina". *The Science of the Total Environment* 520: 1–12.
- Aznar-Sánchez, José, Luis Belmonte-Ureña, María López-Serrano, e Juan Velasco-Muñoz. 2018. "Forest ecosystem services: An analysis of worldwide research". *Forests* 9 (8): 453–71.
- Baltagi, Badi H. 2005. *Econometric Analysis of Panel Data*. 3º ed. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Beneduzi, Anelise, Luiz Gustavo dos Anjos Borges, Samuel Mazzinghy Alvarenga, Helisson Faoro, Emanuel Maltempi de Souza, Luciano Kayser Vargas, e Luciane Maria Pereira Passaglia. 2019. "Distinct Grazing Pressure Loads Generate Different Impacts on Bacterial Community in a Long-Term Experiment in Pampa Biome". *Applied Soil Ecology: A Section of Agriculture, Ecosystems & Environment* 137: 167–77.
- Boubeta, Miguel, María José Lombardía, Manuel Francisco Marey-Pérez, e Domingo Morales. 2015. "Prediction of Forest Fires Occurrences with Area-Level Poisson Mixed Models". *Journal of Environmental Management* 154: 151–58.
- Boubeta, Miguel, María José Lombardía, Manuel Marey-Pérez, e Domingo Morales. 2019. "Poisson Mixed Models for Predicting Number of Fires". *International Journal of Wildland Fire* 28 (3): 237–53.
- Cameron, A. Colin, e Pravin K. Trivedi. 2009. *Microeconometrics Using Stata*. Filadélfia, PA, USA: Stata Press.
- Cardille, Jeffrey A., Stephen J. Ventura, e Monica G. Turner. 2001. "Environmental and Social Factors Influencing Wildfires in the Upper Midwest, United States". *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America* 11 (1): 111–27.
- Catry, Filipe X., Francisco C. Rego, Fernando L. Bação, e Francisco Moreira. 2009. "Modeling and Mapping Wildfire Ignition Risk in Portugal". *International Journal of Wildland Fire* 18 (8): 921–31.
- Chen, Xuan, Barry K. Goodwin, e Jeffrey P. Prestemon. 2014. "Is Timber Insurable? A Study of Wildfire Risks in the U.S. Forest Sector Using Spatio-temporal Models". *American Journal of Agricultural Economics* 96 (1): 213–31.
- Costafreda-Aumedes, Sergi, Carles Comas, e Cristina Vega-Garcia. 2017. "Human-Caused Fire Occurrence Modelling in Perspective: A Review". *International Journal of Wildland Fire* 26 (12): 983–98.
- Dodds, Walter K., Lindsey Bruckerhoff, Darold Batzer, Anne Schechner, Casey Pennock, Elizabeth Renner, Flavia Tromboni, Kari Bigham, e Samantha Grieger. 2019. "The Freshwater Biome Gradient Framework:

- Predicting Macroscale Properties Based on Latitude, Altitude, and Precipitation”. *Ecosphere* (Washington, D.C) 10 (7): 1–33.
- Elia, M., V. Giannico, R. Laforteza, e G. Sanesi. 2019. “Modeling Fire Ignition Patterns in Mediterranean Urban Interfaces”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment: Research Journal* 33 (1): 169–81.
- EMBRAPA. 2020. “Aqua Project Science”. Acesso em: 01/03/2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- FAO. 2020. “Data”. Acesso em: 03/03/2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- Ferreira, Leonardo N., Didier A. Vega-Oliveros, Liang Zhao, Manoel F. Cardoso, e Elbert E. N. Macau. 2020. “Global Fire Season Severity Analysis and Forecasting”. *Computers & Geosciences* 134 (104339): 104339.
- Fonseca-Morello, Thiago, Rossano Marchetti Ramos, Liana O. Anderson, Nathan Owen, Thais Michele Rosan, e Lara Steil. 2020. “Predicting Fires for Policy Making: Improving Accuracy of Fire Brigade Allocation in the Brazilian Amazon”. *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics* 169 (106501): 106501.
- González-Olabarria, José Ramón, Blas Mola-Yudego, e Lluís Coll. 2015. “Different Factors for Different Causes: Analysis of the Spatial Aggregations of Fire Ignitions in Catalonia (Spain): Spatial Aggregations of Fire Ignitions in Catalonia”. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis* 35 (7): 1197–209.
- Grossman, G. M., e A. B. Krueger. 1991. “Environmental impacts of a North American free trade agreement”. *National bureau of Economic Research Working Paper – NBER* (3914), 1–57.
- Grossman, G. M., e A. B. Krueger. 1995. “Economic growth and the environment”. *The Quarterly Journal of Economics* 110 (2): 353–77.
- Guo, Futao, Selvaraj Selvalakshmi, Fangfang Lin, Guangyu Wang, Wenhui Wang, Zhangwen Su, e Aiqin Liu. 2016a. “Geospatial Information on Geographical and Human Factors Improved Anthropogenic Fire Occurrence Modeling in the Chinese Boreal Forest”. *Canadian Journal of Forest Research* 46 (4): 582–94.
- Guo, Futao, Guangyu Wang, Zhangwen Su, Huiling Liang, Wenhui Wang, Fangfang Lin, e Aiqin Liu. 2016b. “What Drives Forest Fire in Fujian, China? Evidence from Logistic Regression and Random Forests”. *International Journal of Wildland Fire* 25 (5): 505–19.
- Hausman, Jerry, Bronwyn H. Hall, e Zvi Griliches. 1984. “Econometric models for count data with an application to the patents-R&D relationship”. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 52 (4): 909–38.
- ILO. 2020. “Statistics and Databases”. Acesso em: 05/03/2021. Disponível em: <https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/lang--en/index.htm>.
- IMF. 2020. “IMF Data”. Acesso em 06/03/2021. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Data>.
- INPE. 2021. “Programa Queimadas”. Acesso em 05/02/2021. Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br//queimadas/portal>.
- Juan, P., J. Mateu, e M. Saez. 2012. “Pinpointing Spatio-Temporal Interactions in Wildfire Patterns”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment: Research Journal* 26 (8): 1131–150.
- Kuznets, S. 1955. “Economic growth and income inequality”. *The American Economic Review* 45 (1): 1–30.
- Mann, Michael L., Enric Batllori, Max A. Moritz, Eric K. Waller, Peter Berck, Alan L. Flint, Lorraine E. Flint, e Emmalee Dolfi. 2016. “Incorporating Anthropogenic Influences into Fire Probability Models: Effects of Human Activity and Climate Change on Fire Activity in California”. *PloS One* 11 (4): 1–21.
- Martínez-Fernández, J., E. Chuvieco, e N. Koutsias. 2013. “Modelling Long-Term Fire Occurrence Factors in Spain by Accounting for Local Variations with Geographically Weighted Regression”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (2): 311–27.
- Michetti, Melania, e Mehmet Pinar. 2019. “Forest Fires across Italian Regions and Implications for Climate Change: A Panel Data Analysis”. *Environmental & Resource Economics* 72 (1): 207–46.

- Murthy, Karthik K., Samir Kumar Sinha, Rahul Kaul, e Srinivas Vaidyanathan. 2019. "A Fine-Scale State-Space Model to Understand Drivers of Forest Fires in the Himalayan Foothills". *Forest Ecology and Management* 432: 902–11.
- Narayanaraj, Ganapathy, e Michael C. Wimberly. 2012. "Influences of Forest Roads on the Spatial Patterns of Human- and Lightning-Caused Wildfire Ignitions". *Applied Geography* (Sevenoaks, England) 32 (2): 878–88.
- Nunes, A. N., L. Lourenço, e A. C. Castro Meira. 2016. "Exploring Spatial Patterns and Drivers of Forest Fires in Portugal (1980–2014)". *The Science of the Total Environment* 573: 1190–202.
- Oliveira, Sandra, Friderike Oehler, Jesús San-Miguel-Ayanz, Andrea Camia, e José M. C. Pereira. 2012. "Modeling Spatial Patterns of Fire Occurrence in Mediterranean Europe Using Multiple Regression and Random Forest". *Forest Ecology and Management* 275: 117–29.
- Oliveira, Sandra, José M. C. Pereira, Jesús San-Miguel-Ayanz, e Luciano Lourenço. 2014. "Exploring the spatial patterns of fire density in Southern Europe using Geographically Weighted Regression". *Applied geography* (Sevenoaks, England) 51: 143–57.
- Oliveira, Glauber Meneses Barboza de, Ivo Wesley Gomes da Silva, Anna Maria da Cruz Ferreira Evaristo, Maria Carolina de Azevedo Serpa, Amanda Noeli Silva Campos, Valeria Dutra, Luciano Nakazato, Daniel Moura de Aguiar, Marcelo Bahia Labruna, e Mauricio Claudio Horta. 2020. "Tick-Borne Pathogens in Dogs, Wild Small Mammals and Their Ectoparasites in the Semi-Arid Caatinga Biome, Northeastern Brazil". *Ticks and Tick-Borne Diseases* 11 (4): 101409.
- Pindyck, Robert S., and Daniel L. Rubinfeld. 1997. *Econometric Models and Economic Forecasts*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill.
- Prestemon, Jeffrey P., David T. Butry, Maria L. Chas-Amil, e Julia M. Touza. 2019. "Net Reductions or Spatiotemporal Displacement of Intentional Wildfires in Response to Arrests? Evidence from Spain". *International Journal of Wildland Fire* 28 (6): 397–411.
- Rappaport, Danielle I., Douglas C. Morton, Marcos Longo, Michael Keller, Ralph Dubayah, e Maiza Nara dos-Santos. 2018. "Quantifying long-term changes in carbon stocks and forest structure from Amazon Forest degradation". *Environmental Research Letters* 13 (6): 065013.
- Reboita, Michelle Simões, Nisia Krusche, Tércio Ambrizzi, e Rosmeri Porfírio da Rocha. 2015. "Entendendo o tempo e o clima na América do Sul". *Terrae didactica* 8 (1): 34–50.
- Rezende, Vanessa Leite, Vanessa Pontara, Marcelo Leandro Bueno, Eduardo van den Berg, e Ary Teixeira de Oliveira-Filho. 2020. "Climate and Evolutionary History Define the Phylogenetic Diversity of Vegetation Types in the Central Region of South America". *Oecologia* 192 (1): 191–200.
- Rodrigues, M., J. de la Riva, e S. Fotheringham. 2014. "Modeling the Spatial Variation of the Explanatory Factors of Human-Caused Wildfires in Spain Using Geographically Weighted Logistic Regression". *Applied Geography* (Sevenoaks, England) 48: 52–63.
- Serra, Laura, Pablo Juan, Diego Varga, Jorge Mateu, e Marc Saez. 2013. "Spatial Pattern Modelling of Wildfires in Catalonia, Spain 2004–2008". *Environmental Modelling & Software: With Environment Data News* 40: 235–44.
- Song, Chao, Mei-Po Kwan, Weiguo Song, e Jiping Zhu. 2017. "A comparison between spatial econometric models and random forest for modeling fire occurrence". *Sustainability* 9 (5): 819–39.
- Sturtevant, Brian R., e David T. Cleland. 2007. "Human and Biophysical Factors Influencing Modern Fire Disturbance in Northern Wisconsin". *International Journal of Wildland Fire* 16 (4): 398–413.
- Su, Zhangwen, Haiqing Hu, Mulualet Tigabu, Guangyu Wang, Aicong Zeng, e Futao Guo. 2019a. "Geographically Weighted Negative Binomial Regression Model Predicts Wildfire Occurrence in the Great Xing'an Mountains Better than Negative Binomial Model". *Forests* 10 (5): 377–425.
- Su, Zhangwen, Mulualet Tigabu, Qianqian Cao, Guangyu Wang, Haiqing Hu, e Futao Guo. 2019b. "Comparative Analysis of Spatial Variation in Forest Fire Drivers between Boreal and Subtropical Ecosystems in China". *Forest Ecology and Management* 454 (117669): 117669.

- Tasker, Kaitlin A., e Eugenio Y. Arima. 2016. "Fire Regimes in Amazonia: The Relative Roles of Policy and Precipitation". *Anthropocene* 14: 46–57.
- The World Bank. 2020. "World Development Indicators". Acesso em 06/03/2021. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#>.
- UNDP. 2020. "Human Development Reports". Acesso em 29/06/2022. Disponível em: <http://hdr.undp.org/>.
- Vadrevu, Krishna P., Anuradha Eaturu, e K. V. S. Badarinath. 2006. "Spatial Distribution of Forest Fires and Controlling Factors in Andhra Pradesh, India Using SPOT Satellite Datasets". *Environmental Monitoring and Assessment* 123 (1–3): 75–96.
- Vasconcelos, Maria José Perestrello de, Sara Silva, Margarida Tomé, Margarida Alvim, e José Miguel Cardoso Pereira. 2001. "Spatial Prediction of Fire Ignition Probabilities: Comparing Logistic Regression and Neural Networks". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67 (1): 73–81.
- Vega-Nieva, Daniel Jose, Maria Guadalupe Nava-Miranda, Eric Calleros-Flores, Pablito Marcelo López-Serrano, Jaime Briseño-Reyes, Carlos López-Sánchez, Jose Javier Corral-Rivas, *et al.* 2019. "Temporal Patterns of Active Fire Density and Its Relationship with a Satellite Fuel Greenness Index by Vegetation Type and Region in Mexico during 2003–2014". *Fire Ecology* 15 (1): 1–19.
- White, B. L. A. 2018. "Satellite Detection of Wildland Fires in South America". *Floresta* 49 (4): 851–58.
- Wooldridge, Jeffrey M. 2010. *Econometric analysis of cross section and panel data*. 2º ed. Londres, England: MIT Press.
- Xiao, Yundan, Xiongqing Zhang, e Ping Ji. 2015. "Modeling Forest Fire Occurrences Using Count-Data Mixed Models in Qiannan Autonomous Prefecture of Guizhou Province in China". *PloS One* 10 (3): e0120621.
- Zhang, Yang, Samsung Lim, e Jason John Sharples. 2016. "Modelling Spatial Patterns of Wildfire Occurrence in South-Eastern Australia". *Geomatics Natural Hazards and Risk* 7 (6): 1800–815.
- Zhang, Yang, e Samsung Lim. 2019. "Drivers of Wildfire Occurrence Patterns in the Inland Riverine Environment of New South Wales, Australia". *Forests* 10 (6): 524–40.

Apêndice

Figura A - Matriz de correlação entre as variáveis explicativas.

	AGRI	AGRO	ÁGUA	FLORE	TEMP	DPOP	EMP	DES	ln(PIBpc)
AGRI	1	0,91*	0,15*	-0,63*	-0,07	-0,25*	-0,23*	0,28*	0,28*
AGRO	0,91*	1	0,14	-0,44*	0,06	-0,08	-0,27*	0,32*	0,37*
ÁGUA	0,15*	0,14	1	-0,62*	-0,20*	-0,15*	-0,57*	0,31*	0,60*
FLORE	-0,63*	-0,44*	-0,62*	1	0,28*	0,34*	0,52*	-0,31*	-0,62*
TEMP	-0,07	0,06	-0,20*	0,28*	1	0,15*	0,12	-0,05	0,02
DPOP	-0,25*	-0,08	-0,15*	0,34*	0,15*	1	-0,05	-0,03	0,00
EMP	-0,23*	-0,27*	-0,57*	0,52*	0,12	-0,05	1	-0,75*	-0,66*
DES	0,28*	0,32*	0,31*	-0,31*	-0,05	-0,03	-0,75*	1	0,45*
ln(PIBpc)	0,28*	0,37*	0,60*	-0,62*	0,02	0,00	-0,66*	0,45*	1

Fonte: Elaborada com base nos dados da pesquisa.

Nota: * denota a significância ao nível de 5%.

CONFLITO DE INTERESSE

Os autores declaram não terem quaisquer conflitos de interesse.

EDITOR-CHEFE

Dante Mendes Aldrichi 

Professor - Department of Economics University of São Paulo (USP)