Machine Translated by Google

ENVIRONMENTAL RESEARCH
HEALTH

CARTA • ACESSO ABERTO

Impactos na saúde da exposição à fumaça no sul América: risco aumentado para populações na Territórios indígenas amazônicos

Para citar este artigo: EX Bonilla idadena 2023 Aproximadamente. Res.: Saúde 1 021007

Veja o artigo on-line para atualizações e melhorias.

você pode gostar

- Impactos na saúde pública da neblina severa na Ásia Equatorial em setembro-outubro de 2015: demonstração de uma nova estrutura para informar as estratégias de manejo do fogo para reduzir a exposição à fumaça a favor do vento Shannon N Koplitz, Loretta J Mickley, Miriam E Marlier et al.
- Exposição de trabalhadores agrícolas na Califórnia à fumaça de incêndios florestais em condições climáticas passadas e futuras Miriam E Marlier, Katherine I Brenner, Jia Coco Liu et al.
- Uma análise da dinâmica do fogo dentro e ao redor de territórios indígenas e áreas protegidas em uma fronteira agrícola brasileira Kaitlin Walker, África Flores-Anderson, Lucio Villa et al.

Este conteúdo foi baixado do endereço IP 177.53.237.25 em 05/10/2023 às 15:06

Machine Translated by Google

IOP Publishing Ambiente. Res.: Saúde 1 (2023) 021007 https://doi.org/10.1088/2752-5309/acb22b

ENVIRONMENTAL RESEARCH
HEALTH

CrossMark

ACESSO LIVRE

RECEBIDO
10 de agosto de 2022

REVISADO
1 de dezembro de 2022

ACEITO PARA PUBLICAÇÃO
11 de janeiro de 2023

PUBLICADOS
4 de maio de 2023

O conteúdo original deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0.

Qualquer distribuição posterior deste trabalho deve manter a atribuição a o(s) autor(es) e o título do trabalho, citação do periódico e DOI.

CARTA

Impactos da exposição à fumaça na saúde na América do Sul: aumento do risco para as populações nos territórios indígenas da Amazônia

EX Bonilla1,ÿÿ, LJ Mickley1 , G Raheja2,3 , S D Eastham4,5ÿ, J J Buonocore6ÿ, A Alencar7, L Verchot8, DM Westervelt2ÿ e MC Castro9

[1] John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA, Estados Unidos da América Lamont-
[2] Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, Estados Unidos da América Departamento
[3] de Ciências da Terra e Ambientais, Columbia University, Nova York, NY, Estados Unidos da América Laboratório para
[4] Aviação e Meio Ambiente, Departamento de Aeronáutica e Astronáutica, Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, MA, Programa Conjunto para Ciência e Política de Mudança
[5] Global dos Estados Unidos, Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, MA, Estados Unidos da América Boston University School of Public
[6] Health, Boston, MA, Estados Unidos da América Instituto de Pesquisa Ambiental da
[7] Amazônia, Brasília, Brasil International Center for Tropical
[8] Agriculture, Cali, Colômbia Harvard TH Chan School of Public
[9] Health, Boston, MA, Estados Unidos da América Autor a quem toda correspondência deve
[ÿ] ser endereçada.

E-mail: eimy.bonilla12@gmail.com

Palavras-chave: qualidade do ar, GEOS-Chem, saúde pública, América do Sul, territórios indígenas

O material suplementar para este artigo está disponível online

Resumo

O material particulado da fumaça emitido por queimadas na Bacia Amazônica representa uma ameaça à saúde humana. Pesquisas anteriores sobre essa ameaça se concentraram principalmente nos impactos da saúde nos países como um todo ou se basearam em dados de internação hospitalar para quantificar a resposta à saúde. Essas análises não captam o impacto sobre as pessoas que vivem em territórios indígenas próximos aos incêndios e que muitas vezes não têm acesso a atendimento médico e podem não comparecer aos hospitais. Aqui quantificamos a mortalidade prematura devido à exposição à fumaça de pessoas que vivem em territórios indígenas em toda a Bacia Amazônica. Usamos o modelo de transporte químico atmosférico GEOS-Chem para simular PM2.5 de incêndios e outras fontes, e aplicamos uma função dose-resposta de concentração atualizada recentemente. Estimamos que a fumaça dos incêndios na América do Sul foi responsável por cerca de 12.000 mortes prematuras a cada ano de 2014 a 2019 em todo o continente, com cerca de 230 dessas mortes ocorrendo em terras indígenas.

Dito de outra forma, a exposição à fumaça é responsável por 2 mortes prematuras por 100.000 pessoas por ano na América do Sul, mas 4 mortes prematuras por 100.000 pessoas nos territórios indígenas.

A Bolívia e o Brasil representam focos de exposição à fumaça e as mortes em territórios indígenas nesses países são de 9 e 12 por 100.000 pessoas, respectivamente. Nossa análise mostra que a fumaça PM2,5 dos incêndios tem um efeito prejudicial à saúde humana em toda a América do Sul, com um impacto desproporcional nas pessoas que vivem em territórios indígenas.

1. Introdução

A poluição do ar causada por incêndios é prejudicial à saúde pública. O material particulado da fumaça da queima de biomassa na Bacia Amazônica pode percorrer grandes distâncias, afetando a qualidade do ar em vários países da América do Sul (Bourgeois *et al* 2015, Bencherif *et al* 2020). Muitos estudos que examinam o impacto do fumo na saúde pública tendem a se concentrar em uma estação ou se baseiam em dados de internação hospitalar (Butt *et al* 2020, 2021, de Souza *et al* 2020, Nawaz e Henze 2020, Ye *et al* 2021). Essas abordagens podem ignorar o impacto da fumaça em populações sem acesso a hospitais e negligenciar as mudanças na mortalidade prematura devido à exposição prolongada à fumaça. Aqui usamos o modelo de transporte químico GEOS-Chem e uma função de resposta de concentração (CRF) atualizada para calcular o excesso de mortalidade devido à exposição ao material particulado fino de

© 2023 O(s) autor(es). Publicado por IOP Publishing Ltd

Machine Translated by Google

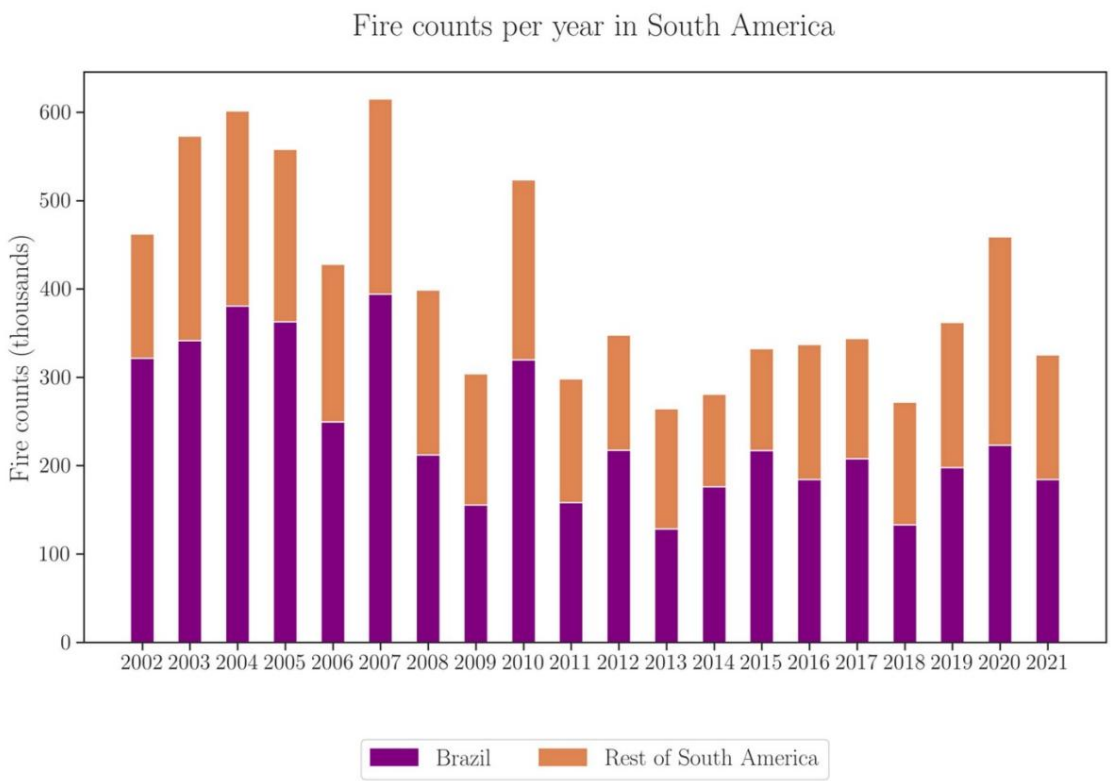

Figura 1. Incêndios contados em milhares por ano na América do Sul, conforme observado pelo espectrorradiômetro de imagem de resolução moderada (MODIS) a bordo do satélite Aqua para 2002–2021. As contribuições da contagem de incêndios no Brasil são mostradas em roxo.

(PM2.5) na América do Sul para 2014–2019, com foco particular nas pessoas que vivem em territórios indígenas na Bacia Amazônica. Nosso estudo é significativo, dado que essas populações vivem próximas a incêndios e que as taxas de queima de biomassa na Amazônia aumentaram recentemente (Barlow *et al* 2019, de Souza *et al* 2020, Human Rights Watch *et al,* 2020, da Silva *et al* 2021).

A atividade do fogo na Bacia Amazônica é impulsionada em grande parte pela atividade humana e variações no clima (Nepstad *et al* 2014, Aragão *et al* 2018, Barlow *et al* 2019, Dos Reis *et al* 2021). Registros de carvão mostram que pequenos incêndios foram introduzidos na floresta tropical há cerca de 4.500 anos como uma ferramenta de manejo agrícola, alterando a composição e a estrutura da floresta natural (Maezumi *et al* 2018a, 2018b). Nas últimas décadas, a intervenção humana – por exemplo, mineração, extração de madeira e uso de terras agrícolas – degradou significativamente a floresta amazônica, ampliando o risco de incêndio (Pivello *et al* 2021). Incêndios também foram deliberadamente iniciados para limpar a terra ou administrar plantações. Usando observações de visibilidade como um substituto para a atividade do fogo, van Marle *et al* (2017) descobriram que as emissões de fogo na Bacia Amazônica foram relativamente baixas de meados da década de 1970 até o final da década de 1980, mas aumentaram rapidamente na década de 1990. Em 2004, o governo brasileiro implementou novas regulamentações para reduzir o desmatamento ilegal em um esforço para desenvolver de forma sustentável a região (Garrett *et al* 2021). De 2005 a 2013, as taxas de desmatamento na região amazônica diminuíram 70% em resposta a essas regulamentações, e a contagem de incêndios diminuiu em aproximadamente 60% (Aragão *et al* 2018, Barlow *et al* 2019, Nepstad *et al* 2014; https:/ / queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal static/estatisticas_paises/). No entanto, essas tendências se inverteram. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) estimou que cerca de 10.000 quilômetros quadrados da Amazônia brasileira foram desmatados de julho de 2018 a agosto de 2019, um aumento de 34% em relação ao ano anterior (Garrett et al 2021, INPE , 2022) . Em 2020, a atividade do fogo aumentou em ÿ74% desde a baixa de 2013 (figura 1), e em 2021, o desmatamento nesta região aumentou para ÿ13.000 km2 por ano, quase o dobro da taxa em 2012 (INPE, (Inst. Nac. Pesqui. Espac.) 2022).

A variabilidade climática também pode influenciar a atividade do fogo na região amazônica. As observações sugerem que o A estação seca aumentou cerca de um mês desde a década de 1970 (Debortoli *et al* 2015, Espinoza *et al* 2016, 2019), e essa tendência, agravada por anos de seca relativamente frequentes (2005, 2010, 2015), aumentou a incidência de incêndios (Aragão *et al* 2014, Aragão *et al* 2018, Marengo *et al* 2017, Brando *et al* 2019, Silveira *et al* 2020). A fragmentação da floresta resultante de anos de intervenção humana na região faz com que os incêndios agrícolas e outros incêndios deliberados possam “escapar” mais facilmente, aumentando a área ardida, especialmente em anos de seca (Fernandes et al 2017) .

As queimadas contínuas na Bacia Amazônica representam uma ameaça à saúde pública (Molina *et al* 2015, Reddington *et al* 2018). Observações da profundidade óptica do aerossol (AOD) da imagem de resolução moderada

Machine Translated by Google

O espectrorradiômetro (MODIS) sugere que a fumaça PM2.5 de incêndios na Bacia Amazônica contribui significativamente para a carga de aerossóis em todo o continente (Castro Videla *et al* 2013, Della Ceca *et al* 2018), e estudos anteriores mostraram que a exposição à fumaça PM2.5 pode levar à mortalidade prematura e doenças respiratórias (Johnson *et al* 2012, Liu *et al* 2015, Reid *et al* 2016). Revisões recentes descobriram que PM2,5 de incêndios florestais também podem afetar outros resultados de saúde, como doenças cardiovasculares, câncer, doenças neuropsicológicas, disfunção metabólica, resultados de nascimento, saúde mental, perda de dias de trabalho e aumento nos custos médicos (Grant e Runkle 2022 , Yu *et al* 2022). Em particular, a poluição por fumaça pode ter um impacto desproporcional nas populações indígenas, dada a proximidade dos incêndios e o acesso limitado a cuidados de saúde, medicamentos, materiais básicos de higiene e água potável. A insegurança alimentar e uma relativa falta de imunidade em comparação com outras populações também podem contribuir para uma maior suscetibilidade entre os indígenas a complicações de doenças respiratórias, como foi documentado durante a pandemia de COVID-19 (Human Rights Watch (HRW) 2020, da Silva et *al* 2021). Para agosto de 2019, dados municipais sugerem que as internações hospitalares de pessoas residentes em territórios indígenas da Amazônia Legal brasileira com mais de 50 anos aumentaram 25% por problemas respiratórios em relação a julho, possivelmente porque a maior exposição à fumaça coincidiu com o aumento de incêndios na região. região (de Souza *et al* 2020). No entanto, os impactos do fumo na saúde dos indígenas da região podem não estar bem documentados devido à falta de infraestrutura de saúde.

A maioria dos estudos anteriores que examinam os impactos da exposição à fumaça na saúde na América do Sul se concentraram nos anos anteriores a 2015, examinaram apenas 1 a 2 anos de temporadas de incêndios (normalmente de julho a novembro) ou se basearam em dados hospitalares. Por exemplo, Reddington *et al* (2015) descobriram que a diminuição da atividade de incêndios em 2001-2012 foi responsável por 400-1700 mortes prematuras a menos a cada ano na América do Sul. Butt *et al* (2020) estimou que os incêndios de 2012 levaram a 16.800 mortes prematuras em todo o continente, enquanto Butt *et al* (2021) descobriram ainda que o aumento da atividade de incêndios em 2019 foi responsável por 3.400 mortes adicionais, em comparação com 2012. Ye *et al* (2021) determinou que um aumento incremental de 10 µg mÿ3 na fumaça PM2.5 na América do Sul foi associado a um aumento de 1,6% nas internações hospitalares por todas as causas durante 2000–2015. Estendendo esses estudos anteriores, Nawaz e Hanze (2020) estimaram as mortes relacionadas à fumaça em quatro temporadas de incêndios, de 2016 a 2019, mas esse estudo se concentrou apenas no Brasil.

Para este estudo, usamos o modelo de transporte químico GEOS-Chem para quantificar a distribuição de fumaça em todo o continente e seu impacto na saúde pública de 2014 a 2019. Baseamo-nos em estudos anteriores examinando o impacto da fumaça PM2.5 na saúde pública por um período de seis anos em toda a América do Sul, bem como na Amazônia Indígena territórios. Também usamos um CRF atualizado da meta-análise de Vodonos *et al* (2018), que foi usado em estudos que examinam o excesso de mortalidade devido a PM2,5 em todo o mundo e regionalmente (Marais *et al* 2019, Vodonos e Schwartz 2021, Vohra *et al* 2021). O InfoAmazonia estimou que a maioria das aldeias indígenas está entre 200 km a 700 km de distância das unidades de terapia intensiva (Geraque 2020).
A aplicação de um CRF nos permite estimar o impacto da exposição à fumaça na saúde sem depender de dados de internação hospitalar, que podem não ser precisos para populações indígenas devido à falta de instalações médicas próximas aos territórios indígenas.

2. Dados e métodos

2.1. Observações in situ e por satélite

Usamos observações de superfície e de satélite para validar o PM2.5 simulado do GEOS-Chem. Informações sobre as observações utilizadas e as etapas realizadas para a validação podem ser encontradas no suplemento (S1).

2.2. GEOS-Chem

Usamos GEOS-Chem v.12.8.1 (DOI: 10.5281/zenodo.3837666), um modelo de transporte químico atmosférico global 3D, conduzido por campos meteorológicos assimilados da análise Retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações, versão 2 (MERRA-2; Gelaro *et al* 2017, https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis /MERRA-2/).
Realizamos dois conjuntos de simulações de grade aninhada de seis anos, com e sem emissões de fogo, com resolução espacial de 0,5ÿ × 0,625ÿ para 2014-2019. Definimos fumaça PM2,5 como a diferença entre as duas simulações com e sem emissões de fogo. Mais detalhes sobre as simulações GEOS-Chem estão no suplemento (S2).

O GEOS-Chem foi usado anteriormente para estimar a mortalidade prematura por PM2.5 de superfície nos níveis global e regional (Eastham e Barrett 2016, Koplitz *et al* 2016, Marais *et al* 2019, Vohra *et al* 2021). Esses estudos anteriores examinaram o excesso de mortalidade devido à exposição ao PM2,5 de várias fontes, incluindo combustão de combustíveis fósseis (Marais *et al* 2019, Vohra *et al* 2021), aviação (Eastham e Barrett 2016) e queima de biomassa (Koplitz *et al* 2016).

2.3. Conjuntos de dados e análise de mortalidade

prematura Para dados populacionais, contamos com o Gridded Population of the World, versão 4, revisão 11 (GPWv4.11; Center for International Earth Science Information Network—CIESIN, 2018) . Este conjunto de dados tem um

Machine Translated by Google

resolução espacial de 2,5 minutos de arco, cerca de 4,6 km no equador. Para estimar a população em territórios indígenas na Bacia Amazônica, mascaramos a população gradeada GPWv4.11 usando shapefiles da Rede Amazônica de Informações Socioambientais Georreferenciadas (RAISG; www. amazoniasocioambiental.org/). Os shapefiles RAISG dos territórios indígenas são os reconhecidos por cada país (www3.socioambiental.org/raisg2015/metadosos/raisg_tis_territorios_indigenas.html). Para todas as nossas análises, usamos estimativas de 2015 para a população, que rende aproximadamente 5,8 milhões de pessoas vivendo em territórios indígenas, ou aproximadamente 1,4% da população total da América do Sul. Estimamos a população total de cada país mascarando a população em grade GPWv4.11 com shapefiles de país; essas populações totais incluem as pessoas que vivem em territórios indígenas na Bacia Amazônica. Para a mortalidade de linha de base, usamos as estimativas da carga global de doenças de 2016 da Organização Mundial da Saúde (OMS 2018).

Para calcular o excesso de mortalidade devido à exposição à fumaça, aplicamos o CRF atualizado de Vodonos *et al* (2018). Mais detalhes podem ser encontrados no suplemento (S3).

3. Resultados

A Figura 1 mostra a série temporal da contagem de incêndios na América do Sul do MODIS de 2002 a 2021. Desde 2002, a contagem anual de incêndios aumentou acima de 600.000 duas vezes, em 2004 e 2007. A contagem de incêndios geralmente diminuiu de 2004 a 2013, para um mínimo de 264.000 em 2013. Então, de 2013 a 2020, a atividade de incêndio aumentou rapidamente, com a contagem de incêndios atingindo aproximadamente 459.000 em 2020, o valor mais alto desde 2010. Cerca de 56% de todos os incêndios na América do Sul de 2014 a 2021 ocorreram no Brasil.

Nós nos concentramos aqui na atividade de incêndio e exposição à fumaça durante os anos de 2014-2019. Descobrimos que o GEOS-Chem pode capturar adequadamente a sazonalidade do AOD em 500 nm, conforme observado nos sites AERONET (figura S1), com valores de AOD na Bacia Amazônica até 0,3 maiores durante a estação seca, em comparação com a estação chuvosa . Os desvios médios normalizados do GEOS-Chem em comparação com o AERONET são -36% durante janeiro-maio e -34% durante julho-novembro. A validação dos resultados do modelo fora das estações úmida e seca da Amazônia produz resultados semelhantes (não mostrados). Em particular, o GEOS-Chem subestima o AOD em 0,1–0,4 em cinco locais na Colômbia durante janeiro-maio, talvez porque o modelo não pode capturar com precisão as emissões antrópicas das cidades próximas ou porque subestima a fumaça dos incêndios que ocorrem nesta região nesta época de ano. A Figura S2 mostra que AOD de GEOS-Chem se correlaciona com os valores sazonais nos sites AERONET com um *r* de 0,81 durante a estação seca, mas apenas 0,54 durante a estação chuvosa. Consistente com a comparação com o AERONET, descobrimos que o GEOS-Chem também subestima o AOD em 550 nm conforme observado pelo MODIS (figura S3), especialmente em regiões propensas a incêndios. Durante janeiro-maio, as subestimativas são maiores na Colômbia, Venezuela e norte do Brasil, e durante julho-novembro são maiores no oeste do Brasil, Paraguai, leste do Peru e Bolívia.

Também validamos os resultados de nosso modelo com as poucas concentrações *in-situ* disponíveis de PM2,5 fora de São Paulo (figura S4). Descobrimos que os valores GEOS-Chem durante a estação seca amazônica se correlacionam com o PM2,5 observado com um *r* de 0,57 e um viés médio normalizado de -25%. Comparado com os dados do local, o GEOS-Chem parece subestimar o PM2,5 durante a estação chuvosa, com um viés médio normalizado de -65%, mas essa incompatibilidade entre o PM2,5 observado e o modelado pode ser devido à alta umidade que afeta os sensores (Ardon-Dryer *et al* 2020, Stavroulas *et al* 2020). A incompatibilidade também pode surgir do desafio de comparar medições pontuais com valores modelados em células de grade grosseira.

Descobrimos que os processos de transporte podem levar a fumaça PM2,5 por uma ampla região da América do Sul. O GEOS-Chem produz melhorias no total de PM2.5 de 5–70 µg m–3 na Amazônia durante a estação seca, em comparação com a estação chuvosa (figura 2), com melhorias menores de 5–30 µg m–3 em grandes áreas do Peru, Bolívia, norte do Brasil, Paraguai e Argentina. Essas diferenças sazonais nas concentrações de PM2,5 são mais pronunciadas durante os anos de seca de 2015 e 2016 em comparação com os anos sem seca (2014, 2017–2019) (figura 2). Os incêndios representam 5% a 40% do aumento de PM2,5 durante a estação chuvosa e 5% a 90% durante a estação seca. De janeiro a maio, a atividade do fogo se desloca para o norte, para a Colômbia e a Venezuela, com aumentos modestos na fumaça PM2,5 de aproximadamente 15 µg m-3 . A superfície PM2.5 também é reforçada nessa época do ano sobre o Oceano Atlântico ao norte do Brasil, devido ao transporte de poeira e fumaça da África (Ansmann *et al* 2009).

A Figura S5 isola a contribuição da fumaça para as diferenças sazonais de PM2.5 vistas na figura 2, revelando concentrações de fumaça de 30–50 µg m–3 na Bacia Amazônica (figura S5).

A Figura 3 mostra que os territórios indígenas na Bacia Amazônica são particularmente afetados pelo aumento da fumaça na superfície PM2.5 durante a estação seca. Muitos pequenos territórios estão espalhados pela Amazônia brasileira e pela Bolívia, sugerindo que as populações que vivem nessas áreas sofrem exposições desproporcionalmente grandes à fumaça. Estimamos as exposições médias mensais à fumaça em três cidades brasileiras—São Paulo no leste do Brasil e Porto Velho e Rio Branco no oeste do Brasil—bem como em Karipuna, um território indígena no oeste do Brasil (figuras S5 e S6). Em São Paulo, a média mensal de PM2,5 varia entre 30 e 70 µg mÿ3 , impulsionada principalmente por emissões antrópicas, como indústrias e

Machine Translated by Google

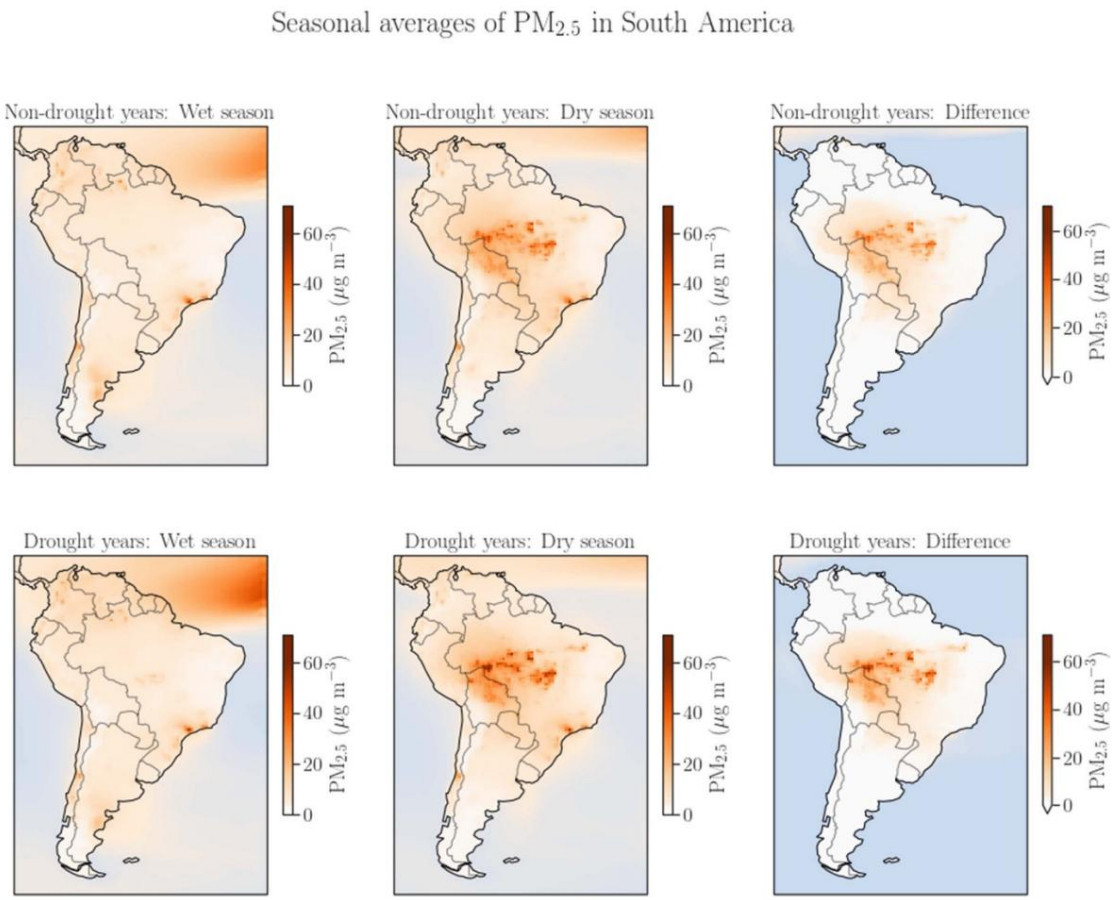

Figura 2. Concentrações simuladas de PM2,5 , em unidades de µg mÿ3 **,** da GEOS-Chem, com média de quatro anos sem seca (2014, 2017–2019, linha superior) e ao longo de dois anos de seca (2015 e 2016, linha inferior). Os valores para a estação chuvosa amazônica (15 de janeiro a 15 de maio) são mostrados à esquerda e para a estação seca (15 de julho a 15 de novembro) na coluna central. Os painéis do lado direito mostram as diferenças sazonais.

fontes de transporte e não por emissões de fogo. Em contraste, as concentrações superficiais de PM2.5 em Porto Velho e Rio Branco, duas cidades localizadas muito mais próximas dos incêndios, exibem uma sazonalidade semelhante à dos incêndios na Amazônia, com concentrações médias mensais variando de 30 a 80 µg m- 3 durante a estação seca. Em Karipuna, as concentrações médias mensais são bastante altas, variando entre 80 e 100 µg m–3 durante a estação seca e chegando a quase 200 µg m–3 em 2019, quando o fogo próximo a esse território foi particularmente intenso.
Dado que as diretrizes da OMS para exposição diária a PM2,5 são definidas em 15 µg m–3 (Organização Mundial da Saúde 2021), essas grandes concentrações médias mensais sugerem efeitos significativos à saúde decorrentes da exposição à fumaça em Porto Velho, Rio Branco e Karipuna.

Em média, os territórios indígenas na Amazônia experimentaram concentrações 1,1 ± 0,4 µg mÿ3 maiores de PM2,5 total médio anual em comparação com toda a América do Sul durante 2014–2019, e 0,64 ± 0,21 µg mÿ3 maiores de fumaça PM2. 5 (figura S7). A distribuição das concentrações médias anuais de PM2.5 totais em todas as células da grade na América do Sul revela que 90% dessas médias caem abaixo de 15 µg m-3 tanto na América do Sul quanto nos territórios indígenas (figura S8). No entanto, outliers podem atingir valores médios anuais de até 50 µg m–3 em alguns anos e gridcells quando se considera toda a América do Sul, e até 30 µg m–3 nos territórios indígenas. Descobrimos que a exposição média anual à fumaça ponderada pela população é maior na Bolívia e no Paraguai, com 2,2 ± 0,75 µg m–3 e 2,09 ± 0,44 µg m–3 (não mostrado). Além disso, as concentrações de fumaça ponderadas pela população são maiores para as pessoas que vivem em territórios indígenas amazônicos, particularmente na Bolívia e no Brasil, onde as concentrações de fumaça experimentadas nesses territórios são aproximadamente 1,5–1,75 µg mÿ 3 maiores do que as médias do país (figura S9).

A Figura 4 apresenta uma série temporal do número anual de mortes prematuras atribuíveis à exposição à fumaça na América do Sul e nos territórios indígenas amazônicos. Para a América do Sul, descobrimos que aproximadamente 12.000 mortes por ano são atribuíveis à exposição ao fumo PM2.5 em 2014–2019, com um intervalo de confiança (CI) de 95% de 3100–20.700; em territórios indígenas, o número de mortes por ano é de aproximadamente 230 (IC: 60–390).
Usando CRFs alternativos de Krewski *et al* (2009) e da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (2010), o excesso de mortalidade pode chegar a aproximadamente 22.600 mortes por ano na América do Sul e aproximadamente 500 em territórios indígenas

Machine Translated by Google

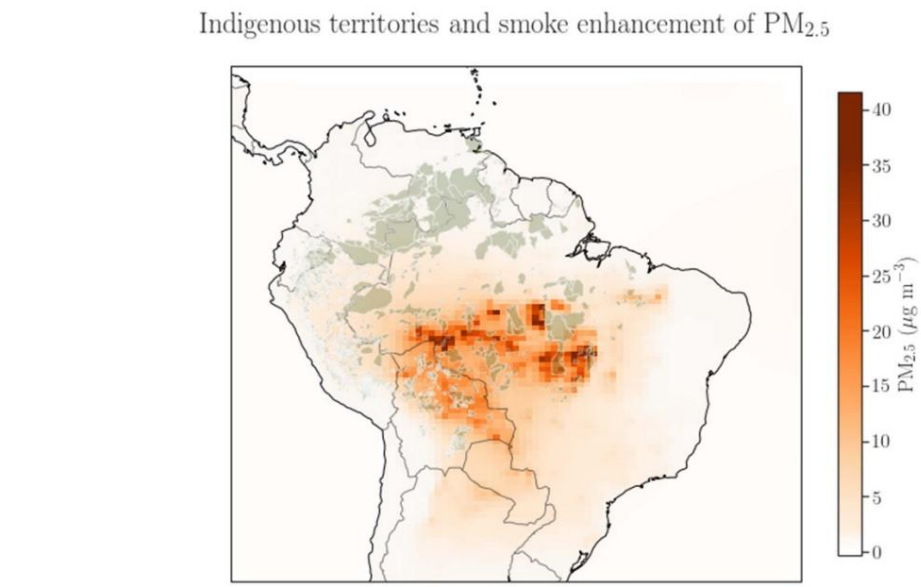

Figura 3. Concentração simulada de PM2.5 de fumaça na superfície , em unidades de µg mÿ3 , média de 2014–2019 para a estação seca amazônica (15 de julho a 15 de novembro). PM2.5 é mostrado em tons de laranja e vermelho; Os territórios indígenas na Bacia Amazônica estão sombreados em verde. Os limites desses territórios são da Rede Amazônica de Informações Socioambientais Georreferenciadas (RAISG; www.amazoniasocioambiental.org/).

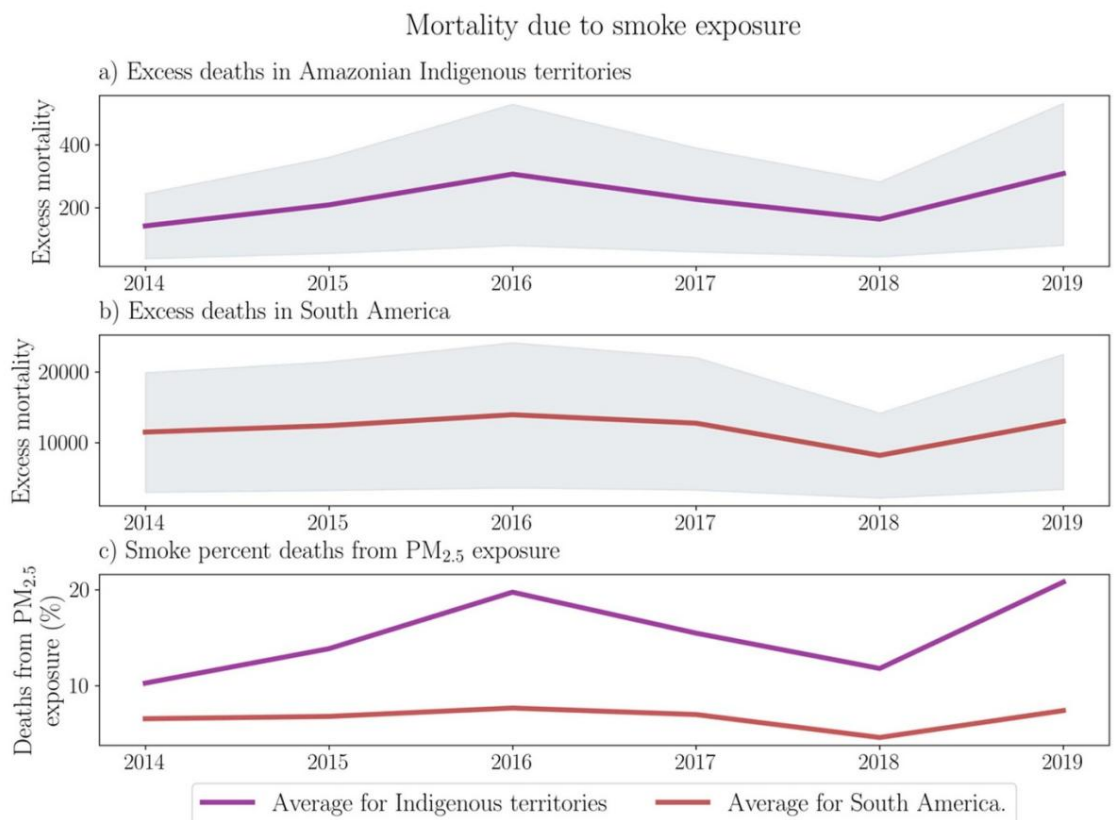

Figura 4. Série temporal do excesso de mortalidade anual devido à exposição ao fumo PM2.5 para 2014–2019. O painel superior mostra o excesso de mortes nos territórios indígenas da Amazônia, e o painel do meio mostra o excesso de mortes em toda a América do Sul. Os contornos cinzas nos painéis superiores e intermediários representam os intervalos de confiança de 95%. O painel inferior mostra a porcentagem de todas as mortes relacionadas ao PM2,5 que podem ser atribuídas à exposição à fumaça. As linhas roxas indicam a porcentagem em territórios indígenas e as linhas vermelhas a porcentagem em toda a América do Sul. As estimativas de mortalidade são calculadas usando a função de resposta de concentração de .Vodonos *et al* (2018)

Machine Translated by Google

(figura S10). A Figura 4 também mostra a contribuição da exposição à fumaça para todas as mortes prematuras relacionadas ao PM2.5. Descobrimos que dessas mortes prematuras, 6,7% na América do Sul podem ser atribuídas à exposição à fumaça, enquanto 15,3% das mortes relacionadas a PM2,5 em territórios indígenas são causadas pela fumaça. Esses valores sugerem uma influência desproporcional da exposição à fumaça nos indígenas em comparação com outras populações.

Descobrimos que a exposição à fumaça leva ao maior excesso de mortalidade para a população em geral no Brasil, Argentina e Colômbia; para as populações que vivem em territórios indígenas, Peru e Bolívia lideram com o maior número de mortes em excesso (figura S11). Por exemplo, no período de 2014-2019, a exposição à fumaça PM2.5 de incêndios é responsável por aproximadamente 39.000 mortes no Brasil e aproximadamente 500 mortes em territórios indígenas no Peru (figura S11). Dos cinco países com as maiores populações indígenas, a taxa de mortalidade devido à exposição ao fumo PM2.5 é maior para a população indígena em todos, exceto um (Venezuela). Em média, a porcentagem da população em risco de morte prematura devido ao fumo na América do Sul é de 0,002%, e para pessoas em territórios indígenas é de 0,004% (figura S12). Isso se traduz em duas mortes relacionadas ao fumo por 100.000 pessoas por ano na América do Sul como um todo, mas o dobro dessa taxa – quatro mortes prematuras por 100.000 pessoas por ano – em terras indígenas (tabela S1).

4. Discussão e conclusões

Usamos uma combinação do modelo de transporte químico GEOS-Chem e um CRF atualizado de Vodonos *et al* (2018) para estimar a mortalidade prematura por exposição à fumaça de incêndios na América do Sul, que ocorrem principalmente na Bacia Amazônica. Descobrimos que a fumaça aumenta as concentrações médias sazonais de PM2.5 em até 40 µg m-3 durante a estação seca amazônica entre 2014–2019 (figura 3). As concentrações médias mensais em territórios indígenas podem atingir valores muito superiores. Por exemplo, em 2019, a concentração média de setembro em Karipuna, um território indígena no oeste do Brasil, atingiu quase 200 µg mÿ3 de média anual, os territórios indígenas amazônicos experimentaram 1,1 ± 0,4 µg mÿ3 a . Em um mais de PM2,5 total e 0,64 ± 0,21 µg m-3 maior fumaça PM2,5 do que toda a América do Sul (figura S7). O maior excesso de mortalidade em nível de país está no Brasil, Argentina e Colômbia, provavelmente porque esses países têm as maiores populações totais da América do Sul. Para as pessoas que vivem em territórios indígenas, as pessoas no Peru e na Bolívia sofrem o maior número de mortes em excesso devido à proximidade com a fumaça (figura S11). Estimamos ainda que aproximadamente 12.000 mortes prematuras ocorrem anualmente na América do Sul devido à exposição à fumaça PM2.5, incluindo aproximadamente 230 mortes nos territórios indígenas amazônicos. Nossos resultados sugerem que as pessoas que vivem nesses territórios indígenas têm duas vezes mais chances de morrer prematuramente por exposição à fumaça, em comparação com a população da América do Sul.

Nossos resultados estão bem dentro da faixa de estimativas anteriores de mortes relacionadas ao fumo na América do Sul, que variam de 5.000 a 17.000 mortes prematuras por ano (Johnston et al 2012, Reddington et al 2015 , Butt et *al* 2020 , *Nawaz* e Henze 2020). Esses estudos se basearam em CRFs mais antigos e não analisaram os impactos nas comunidades indígenas. Pois Butt *et al* (2020, 2021) usaram uma abordagem de exposição-resultado semelhante à que fazemos aqui, mas eles se basearam no Modelo Global de Mortalidade por Exposição (GEMM) de Burnett *et al* (2018) para estimar o risco relativo. O modelo GEMM inclui dados de 41 estudos e concentra-se em cinco causas de morte em pessoas com 25 anos ou mais. Em contraste, a meta-análise de Vodonos *et al* (2018) considerou 53 estudos, tem maior sensibilidade de mortalidade a uma mudança de unidade de PM2,5 do que o GEMM e é responsável por todas as causas de mortalidade em pessoas com 15 anos ou mais.

Nossas estimativas de mortalidade prematura por exposição à fumaça para diferentes populações na América do Sul poderia ser melhorado em trabalhos futuros. Nossas estimativas de concentração de PM2.5 são limitadas pela resolução espacial (0,5ÿ × 0,625ÿ), e trabalhos futuros devem considerar ter uma resolução mais fina ao olhar para locais específicos. Além disso, nossa análise não representa uma contabilização completa da carga de saúde da comunidade indígena, uma vez que não consideramos as pessoas que se identificam como indígenas vivendo fora dos territórios amazônicos. Para este estudo, estimamos o impacto na saúde das pessoas que vivem em territórios indígenas na Bacia Amazônica e não diferenciamos as pessoas com base na identificação como indígena ou não indígena. Também não incorporamos diferenças em populações como etnia, status socioeconômico, renda, educação e comorbidades subjacentes, o que poderia aumentar a vulnerabilidade a resultados adversos à saúde relacionados à poluição do ar. Além disso, os métodos que usamos para estimar as pessoas que vivem nos territórios indígenas amazônicos fornecem uma população total de aproximadamente 5,8 milhões de pessoas, o que pode estar subestimado (Butler 2019). No Brasil, no entanto, calculamos que 443.000 pessoas vivem nesses territórios, consistente com estimativas do governo de 464.000 para 2019 (Souza, Oviedo e dos Santos, 2020). Também não temos estimativas básicas de mortalidade para territórios indígenas individuais, como temos para cada país. Nem Vodonos *et al* (2018) nem Burnett *et al* (2018) incluíram estudos de coorte da América do Sul ao desenvolver seus CRFs, indicando a necessidade de uma análise detalhada da associação entre PM2,5 e saúde neste continente. Os CRFs aqui também não levam em consideração a possibilidade de que o PM2.5 de incêndios florestais possa incorrer em um grau de dano diferente do PM2.5 de outras fontes, ou como isso pode ser afetado por mudanças na composição química

Machine Translated by Google

composição à medida que a pluma de incêndio envelhece (Atwi *et al* 2022). Para este trabalho, nos concentramos nos impactos à saúde das exposições médias anuais à fumaça; as consequências agudas para a saúde de exposições de curto prazo à fumaça também podem ser significativas. Além disso, a discussão dos impactos na saúde poderia ser ampliada de estimativas puramente de mortalidade para exame de morbidade, dias perdidos de escola/trabalho e encargos de custos de saúde. Finalmente, para obter uma maior compreensão das formas como a atividade do fogo afeta a saúde pública e o bem-estar, trabalhos futuros devem envolver mais de perto as pessoas que vivem nos territórios indígenas amazônicos. Recomendamos que os governos forneçam assistência financeira para monitorar a qualidade do ar, como a implantação de monitores de referência e sensores de baixo custo bem calibrados em territórios indígenas para estudar o impacto da exposição de curto e longo prazo à fumaça.

Em resposta às regulamentações de desmatamento, a contagem de incêndios no Brasil diminuiu em aproximadamente 70% de 2004 a 2011 (Aragão *et al* 2018, Barlow *et al* 2019). Desde 2013, no entanto, essa tendência de queda na atividade de incêndio foi revertida. Dados esses recentes aumentos na atividade de fogo na Bacia Amazônica, nossos resultados implicam em consequências significativas e desproporcionais para os povos indígenas. No entanto, o fogo não afeta apenas a qualidade do ar, mas também afeta a segurança alimentar dessas comunidades por meio da destruição da vegetação tropical. Ao exacerbar a erosão, o fogo também pode contaminar os cursos de água, distribuindo detritos, toxinas e nutrientes nocivos por toda a bacia hidrográfica (Human Rights Watch, 2020). Desde 2000, desmatamento, incêndios, construção de estradas e mudanças no uso da terra levaram a uma Bacia Amazônica mais seca e menos resistente ao fogo, uma tendência que persistirá se o desmatamento continuar aumentando (Boulton et al 2022) . Pesquisas anteriores sugeriram benefícios substanciais quando as comunidades indígenas recebem provisões de 'tratamento como um estado' para criar políticas ambientais e regular os recursos naturais separadamente dos governos estaduais (Diver et al 2019 , Hart -Fredeluces *et al* 2021). Por exemplo, essas comunidades limitaram o desmatamento e a propagação de incêndios evitados e atuaram como guardiões da biodiversidade, qualidade da água e outros ativos ambientais (Nepstad *et al* 2006, Diver *et al* 2019, Dos Santos *et al* 2021, Hart-Fredeluces *e outros* 2021). Embora os territórios indígenas representem relativamente poucos incêndios na Bacia Amazônica (Dos Reis *et al* 2021), nosso trabalho indica que as pessoas que vivem nesses territórios experimentam riscos de saúde significativamente maiores devido ao PM2.5 relacionado à fumaça, em comparação com a população em geral.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados que sustentam os achados deste estudo estão disponíveis no seguinte URL/DOI: https://doi.org/10.7910/DVN/Z06WGF.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro fornecido pelo Dean's Fund for Scientific Advancement da Harvard TH Chan School of Public Health. Agradecemos aos cientistas e funcionários do AERONET por estabelecer e manter os 51 sites AERONET usados nesta investigação. Agradecemos aos cientistas da missão MODIS e pessoal associado da NASA pela produção dos dados usados neste esforço de pesquisa e ao site Giovanni, desenvolvido e mantido pelo NASA GES DISC, que forneceu acesso aos conjuntos de dados. Os dados do MERRA-2 usados neste estudo foram fornecidos pelo Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) no Goddard Space Flight Center da NASA. Agradecemos à Rede Amazônica de Informações Socioambientais Georreferenciadas (RAISG; www.amazoniasocioambiental.org/) para os shapefiles dos territórios indígenas amazônicos.

Declaração de acesso a dados

Os dados serão publicados no repositório público Dataverse antes da aceitação.

Contribuições do autor

EXB e LJM projetaram a pesquisa com a ajuda de JJB e MC C. EXB realizou o GEOS-Chem e cálculos de saúde pública com assistência de SDE e JJ B. A validação de PM2.5 simulado de GEOS-Chem com Purple Air foi conduzida por GR com assistência de DM W. EXB e LJM escreveram o artigo com contribuições de LV, AA e de todos os outros autores.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver interesses conflitantes.

Machine Translated by Google

IDs ORCID

EX Bonilla ÿ https://orcid.org/0000-0003-1448-6438 SD
Eastham ÿ https://orcid.org/0000-0002-2476-4801 JJ
Buonocore ÿ https://orcid.org/0000-0001-7270-892X DM
Westervelt ÿ https://orcid.org/0000-0003-0806-9961

Referências

Ansmann A, Baars H, Tesche M, Müller D, Althausen D, Engelmann R, Pauliquevis T e Artaxo P 2009 Transporte de poeira e fumaça da África para a América do Sul: perfis lidar sobre cabo verde e a floresta amazônica Geophys . *Res. Deixe* **36** L11802 Aragão LEOC *et al* 2018 Os incêndios relacionados à seca do século 21 neutralizam o declínio das emissões de carbono do desmatamento da Amazônia *Nat. Comum.* **9** 1–12

Aragão LEOC, Poulter B, Barlow JB, Anderson LO, Malhi Y, Saatchi S, Phillips OL e Gloor E 2014 Mudança ambiental e balanço de carbono das florestas amazônicas *Biol. Rev.* **89** 913–31

Ardon-Dryer K, Dryer Y, Williams JN e Moghimi N 2020 Medições de PM2.5 com PurpleAir sob condições atmosféricas *Atmos. Medição Tecnologia* **13** 5441–58

Atwi K *et al* 2022 Resposta diferencial de células epiteliais pulmonares humanas a material particulado em fumaça de queima de biomassa fresca e envelhecida fotoquimicamente *Atmos. Ambiente.* **271** 118929

Barlow J, Berenguer E, Carmenta R e França F 2019 Esclarecendo a crise ardente da Amazônia *Glob. Alterar biol.* **26** 319–21 Bencherif H *et al* 2020 Investigando o transporte de longo alcance de plumas de aerossóis após os incêndios na Amazônia (agosto de 2019): uma abordagem multi-instrumental a partir de observações terrestres e de satélite *Sensores Remotos* **12** 3846

Boulton CA, Lenton TM e Boers N 2022 Perda pronunciada da resiliência da floresta amazônica desde o início dos anos 2000 *Nat. Clim. Mudar* **12** 271–8

Bourgeois Q, Ekman AML e Krejci R 2015 Transporte de aerossóis sobre os Andes desde a bacia amazônica até o remoto Oceano Pacífico: uma avaliação CALIOP plurianual *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 8411–25

Brando PM, Paolucci L, Ummenhofer CC, Ordway EM, Hartmann H, Cattau ME, Rattis L, Medjibe V, Coe MT e Balch J 2019 Secas, incêndios florestais e ciclagem de carbono florestal: uma síntese pantropical Annu . *Rev. Planeta Terra. ciência* **47** 555–81 Burnett R *et al* 2018 Estimativas globais de mortalidade associadas à exposição prolongada a partículas finas externas *Proc. Natl Acad. Ski. EUA* **115** 9592–7

Butler RA 2019 People in the Amazon Rainforest *Mongabay* (disponível em: https://rainforests.mongabay.com/amazon/amazon_people.html) (Acessado em 28 de março de 2022)

Butt EW *et al* 2020 'Grandes impactos na qualidade do ar e na saúde humana devido aos incêndios na floresta amazônica e na vegetação *Environ. Res. Comum.* **2** 095001

Butt EW, Conibear L, Knote C e Spracklen DV 2021 Grandes impactos na qualidade do ar e na saúde pública devido ao desmatamento na Amazônia incêndios em 2019 *GeoHealth* **5** e2021GH000429

Centro para Rede Internacional de Informações sobre Ciências da Terra - CIESIN, C. U 2018 População em grade do mundo, versão 4 (GPWv4): densidade populacional ajustada para corresponder à revisão de 2015 UN WPP Country Totals, Revisão 11ÿ . Palisades (Nova York : NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)) (disponível em: https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-adjusted-to-2015-unwpp -country-totals-rev11) (Acesso em 4 de março de 2022) da Silva LL, Nascimento PE, Araujo OCG e Pereira TMG 2021 A articulação dos povos indígenas do Brasil no enfrentamento da Frente Pandêmica Covid-19 . *Social.* **6** 611336

de Souza A A, Oviedo A and Dos Santos T M 2020 Impactos na qualidade do ar e saude humana relacionados ao desmatamento e queimadas na Amazˆonia Legal Brasileira *Instituto Socioambiental* pp 1–21 (available at: https://acervo.socioambiental.org/sites/ default/files/documents/prov085.pdf)

Debortoli NS, Dubreuil V, Funatsu B, Delahaye F, de Oliveira CH, Rodrigues-Filho S, Saito CH e Fetter R 2015 Padrões de precipitação em Amazônia Meridional: uma perspectiva cronológica (1971-2010) *Clim. Mudança* **132** 251–64

Della Ceca LS, García Ferreyra MF, Lyapustin A, Chudnovsky A, Otero L, Carreras H e Barnaba F 2018 Visão por satélite da variabilidade espacial e temporal do aerossol na região de Córdoba (Argentina) usando mais de dez anos de dados de alta resolução *ISPRS J. Fotograma. Sensor remoto* **145** 250–67

Diver S, Ahrens D, Arbit T e Bakker K 2019 Envolvendo envolvimentos coloniais: política de "tratamento como um estado" para a água indígena co-governação *Glob. Ambiente. Política* **19** 33–56

Dos Reis M, Graça P M L D A, Yanai A M, Ramos C J P and Fearnside P M 2021 Forest fires and deforestation in the central Amazon: efeitos da paisagem e do clima na dinâmica espacial e temporal *J. Environ. Gerenciar.* **288** 112310 Dos Santos AM, Silva CFAD, Rudke AP e Oliveira Soares DD 2021 Dinâmica de dados de fogo ativo e sua relação com fogos em áreas de terras indígenas regularizadas na Amazônia Meridional Sens. Remoto Appl.: Soc . *Ambiente.* **23** 100570 Eastham SD e Barrett SRH 2016 Ozônio atribuível à aviação como um fator para mudanças na mortalidade relacionadas à qualidade do ar e da pele câncer *Atmos. Ambiente.* **144** 17–23

Espinoza JC, Ronchail J, Marengo JA e Segura H 2019 Mudanças norte-sul contrastantes na frequência de dias úmidos e dias secos na Amazônia e características atmosféricas relacionadas (1981–2017) *Clim. Din.* **52** 5413–30

Espinoza JC, Segura H, Ronchail J, Drapeau G e Gutierrez-Cori O 2016 Evolução da frequência de dias úmidos e secos no oeste da Bacia Amazônica: relação com a circulação atmosférica e impactos na vegetação Recursos Hídricos . *Res.* **52** 8546–60 Fernandes K, Verchot L, Baethgen W, Gutierrez-Velez V, Pinedo-Vasquez M e Martius C 2017 Maior probabilidade de incêndio na Indonésia em condições sem seca: o efeito do aumento das temperaturas Environ. Res. Deixe **12** 054002 Garrett RD, Cammelli F, Ferreira J, Levy SA, Valentim J e Vieira I 2021 Florestas e desenvolvimento sustentável no Brasil Amazon: história, tendências e perspectivas futuras *Annu. Rev. Environ. Recurso.* **46** 625–52

Gelaro R *et al* 2017 A análise retrospectiva da era moderna para pesquisa e aplicações, versão 2 (MERRA-2) *J. Clim.* **30** 5419–54 Geraque E 2020 Longe de UTIs e ventiladores, indígenas da Amazônia tentam se proteger do vírus *InfoAmazonia* (available at: https://infoamazonia.org/en/2020/05/11/distantes-de-utis-e-respiradores-indigenas-da-amazonia tentam-se-blindar-do-virus/) (Accessed 20 April 2022)

Grant E e Runkle JD 2022 Efeitos a longo prazo da exposição a incêndios florestais na saúde: uma revisão de escopo *J. Clim. Alterar saúde* **6** 100110

Machine Translated by Google

Hart-Fredeluces GM, Ticktin T e Lake FK 2021 Simulação do manejo do fogo indígena aumenta a taxa de crescimento populacional de uma erva do sub-bosque *J. Ecol.* **109** 1133–47 Human Rights Watch

(HRW) 2020 Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) e Instituto de Estudos para Políticas de Saude (IEPS) ´O ar é insuportável': Impactos na *saúde dos incêndios relacionados ao desmatamento na Amazônia brasileira* (disponível em: www.hrw.org/report/2020/08/26/air-unbearable/health-impacts-deforestation- relacionados-incêndios-brazilian-amazon#) (Acessado em 2 de fevereiro de 2022)

INPE, (Inst. Nac. Pesqui. Espac.) 2022 Projeto PRODES: monitoramento do desmatamento da floresta Amazˆonica Brasileira por satélite (disponível em: www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes) (Acessado em 28 de abril de 2022)

Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, Randerson JT, Marlier M, DeFries RS, Kinney P, Bowman DMJS e Brauer M 2012 Mortalidade global estimada atribuível à fumaça de incêndios de paisagem Environ . *Perspectiva de Saúde.* **120** 695–701

Koplitz SN *et al* 2016 Impactos na saúde pública da neblina severa na Ásia Equatorial em setembro-outubro de 2015: demonstração de uma nova estrutura para informar as estratégias de manejo do fogo para reduzir a exposição à fumaça do vento *Environ. Res. Deixe* **11** 9 Krewski D *et al* 2009 *Acompanhamento Estendido e Análise Espacial do Estudo da American Cancer Society que Liga a Poluição do Ar por Partículas e Mortalidade* (Boston, MA: Health Effects Institute)

Liu JC *et al* 2015 Uma revisão sistemática dos impactos na saúde física da exposição não ocupacional à fumaça de incêndio florestal *Env. Res.* **136** 120–32

Maezumi SY, Alves D, Robinson M, de Souza JG, Levis C, Barnett RL, Almeida de Oliveira E, Urrego D, Schaan D e Iriarte J 2018b O legado de 4.500 anos de policultura agroflorestal na Amazônia oriental Nat . *plantas* **4** 540–7 Maezumi SY, Robinson M, de Souza J, Urrego DH, Schaan D, Alves D e Iriarte J 2018a Novas percepções do uso da terra pré-colombiana e manejo do fogo em florestas de terra escura amazônica *Front. Eco. Evolução* **6** 1–23 Marais EA, Silvern RF, Vodonos A, Dupin E, Bockarie AS, Mickley LJ e Schwartz J 2019 Qualidade do ar e impacto futuro na saúde uso de combustível fóssil para geração de eletricidade e transporte na África *Environ. ciência Tecnol.* **53** 13524–34

Marengo JA, Fisch GF, Alves LM, Sousa NV, Fu R e Zhuang Y 2017 Contexto meteorológico do início e fim da estação chuvosa na Amazônia Central durante o GoAmazon2014/5ÿ Atmos . *Chem. Física* **17** 7671–81 Molina LT *et al* 2015 Poluição futura da Terra e seus impactos na criosfera sul-americana *Earth's Future* **3** 345–69 Nawaz MO e Henze DK 2020 Mortes prematuras no Brasil associadas à exposição prolongada a PM2,5 de incêndios na Amazônia entre 2016 e 2019' *GeoHealth* **4** 8

Nepstad D *et al* 2006 Inibição do desmatamento e queimadas na Amazônia por parques e terras indígenas *Biol. Conserva* **20** 65–73 Nepstad D *et al* 2014 Retardando o desmatamento da Amazônia por meio de políticas públicas e intervenções nas cadeias produtivas de abelhas e soja *Ciência* **344** 1118–23

Pivello VR *et al* 2021 Entendendo os incêndios catastróficos do Brasil: causas, consequências e políticas necessárias para evitar futuras tragédias *Perspect. Eco. Conserva* **19** 233–55 Reddington CL *et al* 2018 Aerossol de queima de biomassa sobre a Amazônia: análise de observações de aeronaves, superfície e satélite usando um modelo global de aerossol *Atmos. Chem. Física* **19** 1–32

Reddington CL, Butt EW, Ridley DA, Artaxo P, Morgan WT, Coe H e Spracklen DV 2015 Qualidade do ar e saúde humana melhorias de reduções em incêndios relacionados ao desmatamento no Brasil *Nat. Geosci.* **8** 768–71 Reid CE, Brauer M, Johnston FH, Jerrett M, Balmes JR e Elliott CT 2016 Revisão crítica dos impactos na saúde da fumaça de incêndios florestais exposição *Ambiente. Perspectiva de Saúde.* **124** 1334–43

Silveira MVF *et al* 2020 Causadores de anomalias de incêndio na Amazônia brasileira: lições aprendidas com a crise de incêndio de 2019 *Terra* **9** 516

Stavroulas I, Grivas G, Michalopoulos P, Liakakou E, Bougiatioti A, Kalkavouras P, Fameli K, Hatzianastassiou N, Mihalopoulos N e Gerasopoulos E 2020 Avaliação de campo de sensores PM de baixo custo (Purple Air PA-II) sob variável qualidade do ar urbano condições, na Grécia *Atmosfera* **11** 926 Agência de Proteção Ambiental dos EUA

2010 Avaliação quantitativa de risco à saúde para material particulado. Agência de Proteção Ambiental dos EUA (disponível em: www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/data/PM_RA_FINAL_June_2010.pdf) (Acessado em 4 de março de 2022) van Marle MJE, Field RD, van der Werf GR, Estrada de Wagt IA, Houghton RA, Rizzo LV, Artaxo P e Tsigaridis K 2017 Dinâmica do fogo e do desmatamento na Amazônia (1973–2014) Glob . *Biogeochem. Ciclos* **31** 24–38

Videla FC, Barnaba F, Angelini F, Cremades P e Gobbi GP 2013 O papel relativo dos incêndios amazônicos e não amazônicos na construção a profundidade óptica do aerossol na América do Sul: um estudo de cinco anos (2005–2009) *Atmos. Res.* **122** 298–309

Vodonos A, Awad YA e Schwartz J 2018 A concentração-resposta entre a exposição a longo prazo ao PM 2.5 e a mortalidade; A abordagem de meta-regressão *Env. Res.* **166** 677–89

Vodonos A e Schwartz J 2021 Estimativa do excesso de mortalidade devido à exposição de longo prazo a PM2.5 na parte continental dos Estados Unidos usando um modelo *Environ de alta resolução espaço-temporal. Res.* **196** 110904

Vohra K, Vodonos A, Schwartz J, Marais EA, Sulprizio MP e Mickley LJ 2021 Mortalidade global por poluição externa por partículas finas gerado pela combustão de combustível fóssil: resultados do GEOS-Chem *Environ. Res.* **195** 110754

Estimativas globais de saúde da OMS 2018 *2016: mortes por causa, idade, sexo, por país e região, 2000–2016* Organização Mundial da saúde 2021 *Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: material particulado (PM2,5 e PM10), ozônio, dióxido de nitrogênio, Dióxido de Enxofre e Monóxido de Carbono* (Genebra: Organização Mundial da Saúde)

Ye T, Guo Y, Chen G, Yue X, Xu R, Coˆelho MDSZS, Saldiva PHN, Zhao Q e Li S 2021 Risco e carga de internações hospitalares associadas ao PM2.5 relacionado a incêndios florestais no Brasil, 2000–15: um estudo nacional estudo de séries temporais *Lancet Planet. saúde* **5** e599–e607 Yu Y, Zou WW, Jerrett M e Meng YY 2022 Impacto agudo na saúde de PM2.5 convectivo e relacionado a incêndios florestais : uma revisão narrativa *Adv. Aproximadamente.* 100179