



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

WALTER AGUIAR MARTINS JÚNIOR

LETALIDADE DAS VÍTIMAS DE RAIOS NO MUNDO E ANÁLISE
EPIDEMIOLÓGICA NO BRASIL

CUIABÁ - MT
2025

WALTER AGUIAR MARTINS JÚNIOR

**LETALIDADE DAS VÍTIMAS DE RAIOS NO MUNDO E ANÁLISE
EPIDEMIOLÓGICA NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física Ambiental do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Física Ambiental (Ciências Ambientais).

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes

Coorientador: Prof. Dr. Danilo Ferreira de Souza

**CUIABÁ-MT
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

M386l Martins Júnior, Walter Aguiar.
Letalidade das vítimas de raios no mundo e análise epidemiológica no Brasil
[recurso eletrônico] / Walter Aguiar Martins Júnior. -- Dados eletrônicos (1 arquivo
: 70 f., pdf). -- 2025.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.

Coorientador: Danilo Ferreira de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2025.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Análise epidemiológica. 2. Revisão. 3. Vítimas de raios. 4. Índice de
letalidade. 5. Desigualdades. I. Biudes, Marcelo Sacardi, *orientador*. II. de Souza,
Danilo Ferreira, *coorientador*. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: LETALIDADE DAS VÍTIMAS DE RAIOS NO MUNDO E ANÁLISE
EPIDEMIOLÓGICA NO BRASIL**

AUTOR: MESTRANDO WALTER AGUIAR MARTINS JÚNIOR

Dissertação defendida e aprovada em **30 de MAIO de 2025**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES [Presidente Banca / **Orientador**]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. PROF. DR. DANILO FERREIRA DE SOUZA [Co-orientador]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. PROFA DRA. NADJA GOMES MACHADO [Examinadora Interna]

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DE MATO GROSSO

4. PROF. DR. KLEBER PINHEIRO NACCARATO [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CUIABÁ, 30/05/2025.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 04/06/2025, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **NADJA GOMES MACHADO, Usuário Externo**, em 04/06/2025, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **DANILO FERREIRA DE SOUZA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 04/06/2025, às 14:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Pinheiro Naccarato, Usuário Externo**, em 04/06/2025, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7991088** e o código CRC **ED324320**.

Dedico este trabalho à *Abracopel – Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade*. Foi por meio da atuação incansável da Abracopel que recebi a inspiração e o chamado à reflexão sobre a segurança elétrica e os riscos associados à eletricidade, especialmente no que se refere aos acidentes com vítimas de raios. Esta pesquisa é, em parte, fruto do compromisso coletivo com a preservação da vida e da promoção de uma cultura de prevenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus — fonte de vida, sabedoria e propósito — por conceder tempo, talento e saúde ao longo desta jornada. Ao Criador de todas as coisas, da natureza e de suas leis físicas, minha reverência e gratidão.

Às instituições que tornaram este percurso possível: ao Tribunal de Contas do Estado de Mato Grosso (TCE-MT) e à Fundação Uniselva, na pessoa do senhor Américo Santos Corrêa, meu líder imediato, pelo apoio constante e pela sensibilidade em viabilizar minha participação nas aulas do mestrado, conciliando as exigências profissionais com os compromissos acadêmicos.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na pessoa do Dr. Kleber Naccarato, por acompanhar atentamente o desenvolvimento deste trabalho e por suas contribuições valiosas durante o processo de revisão científica.

Ao Prof. Dr. Danilo Ferreira de Souza, cuja coorientação desde os primeiros passos foi fundamental para a solidez metodológica e conceitual deste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (PGFA/UFMT), representado com excelência pela Profa. Dra. Daniela de Oliveira Maionchi e pelo Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes, pela orientação dedicada e inspiradora. À Profa. Dra. Nadja Gomes Machado, expresse minha gratidão pela generosidade com que revisou este trabalho, especialmente no que tange às análises epidemiológicas.

A todos, meu profundo reconhecimento e sincero agradecimento.

RESUMO

Os raios representam uma das manifestações naturais mais letais, com impactos marcantes sobre a saúde pública em contextos tropicais e de desigualdade social. Este estudo investigou padrões epidemiológicos de mortalidade por raios no Brasil e em outros países, integrando resultados de revisão sistemática de literatura (1996–2024) com dados oficiais de hospitalizações e óbitos no Brasil (1998–2022). A metodologia adotou abordagem quantitativa e comparativa, contemplando dimensões temporais, espaciais e sociodemográficas. Os resultados mostram que o Brasil apresenta Índice de Letalidade de 66,9%, posicionando-se entre os mais elevados globalmente. As regiões Centro-Oeste (85,6%) e Norte (83,8%) superam a média nacional, enquanto o Sul registra 40,6%. Predominaram vítimas do sexo masculino, de baixa escolaridade, e os principais locais de ocorrência foram residências e fazendas durante o período chuvoso e nos horários de maior atividade convectiva. Conclui-se que a mortalidade por raios no Brasil está estreitamente vinculada a fatores socioeconômicos e ambientais, demandando ações integradas de mitigação, fortalecimento de infraestrutura e educação preventiva, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 10 e 13).

Palavras-chave: análise epidemiológica, revisão, vítimas de raios; índice de letalidade, desigualdades.

ABSTRACT

Lightning stands as one of the deadliest natural phenomena, with significant impacts on public health, particularly in tropical regions marked by social inequality. This study investigated epidemiological patterns of lightning-related mortality in Brazil and other countries by integrating findings from a systematic literature review (1996–2024) with official data on hospitalizations and deaths in Brazil (1998–2022). A quantitative and comparative methodological approach was adopted, encompassing temporal, spatial, and sociodemographic dimensions. Results indicate that Brazil has a case fatality rate of 66.9%, ranking among the highest globally. The Central-West (85.6%) and North (83.8%) regions exceed the national average, while the South records 40.6%. Most victims were male, had low levels of education, and the main sites of occurrence were households and farms, especially during the rainy season and peak convective hours. The study concludes that lightning mortality in Brazil is strongly associated with socioeconomic and environmental factors, requiring integrated mitigation actions, infrastructure strengthening, and preventive education—aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs 3, 10, and 13).

Keywords: epidemiological analysis, review, lightning victims, case fatality rate, inequalities.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Breve História dos Raios: da Mitologia aos Fundamentos Científicos	15
2.2. Formação de Tempestades.....	17
2.3. A Física dos Raios	19
2.4. Instrumentos de Detecção e Medição de Raios	20
2.5. Incidência de Raios no Mundo e no Brasil.....	22
2.6. Danos e Vítimas por Raios	23
2.7. Mecanismos de Acidentes com Raios e Efeitos no Corpo Humano	24
2.8. Epidemiologia e Índices Epidemiológicos	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1. Revisão sistemática da literatura sobre relatórios das vítimas de raios no mundo.....	30
3.2. Análise epidemiológica das vítimas de raios do Brasil	34
3.3. Qualidade dos Dados Utilizados	36
4. RESULTADOS	39
4.1. Índice de Letalidade das Vítimas de Raios no Mundo	39
4.2. Análise Temporal	41
4.3. Análise Espacial	47
4.4. Análise Demográfica	54
5. DISCUSSÃO	58
5.1. Comparação Internacional das Taxas de Letalidade	58
5.2. Vulnerabilidades socioeconômicas e desigualdades regionais.....	59
5.3. Influência da Urbanização, Poluição e Ilha de Calor Urbana.....	60
5.4. Dinâmica temporal e padrões de atividade humana	61
5.5. Perfil sociodemográfico das vítimas e implicações em políticas públicas	62
6. CONCLUSÕES	64
7. REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

Os raios constituem uma das manifestações naturais mais potentes e perigosas, gerando impactos sociais, econômicos e ambientais expressivos. Em escala mundial, essas descargas figuram entre os principais agentes de fatalidades meteorológicas extremas, superando, em diversos cenários, eventos como enchentes e terremotos. Além das perdas humanas, os prejuízos econômicos atingem bilhões de dólares anuais e comprometem infraestrutura essencial (energia, telecomunicações e transporte) assim como propriedades agrícolas, pequenas empresas e residências, particularmente em países em desenvolvimento, onde a subnotificação é elevada e os sistemas de monitoramento ainda são incipientes (COOPER; HOLLE, 2019).

No Brasil, país com uma das maiores incidências de raios do planeta, o agravamento dos eventos é fortemente influenciado pela urbanização acelerada e pelas mudanças climáticas globais. Evidências mostram que a expansão urbana em Manaus intensificou a densidade de descargas na Amazônia; que na Região Metropolitana de São Paulo a poluição atmosférica altera a frequência semanal de raios; e que a ilha de calor urbana potencializa tempestades ao acentuar contrastes térmicos vespertinos, destacando a influência de fatores antropogênicos como urbanização, poluição e mudanças na cobertura do solo (BOURSCHEIDT et al., 2016; FARIAS et al., 2014; PINTO JR. et al., 2013).

Modelos climáticos globais indicam ainda uma relação direta entre o aumento da temperatura média do planeta e o incremento da atividade elétrica atmosférica. Estimativas sugerem elevações de 5 a 6 % na frequência global de raios por grau Celsius de aquecimento — sobretudo em áreas tropicais e continentais — e até 12 % em cenários específicos, como nos Estados Unidos, quando se consideram indicadores de instabilidade atmosférica (PRICE; RIND, 1994; ROMPS et al., 2014).

No contexto nacional, as pesquisas do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT/INPE) foram fundamentais para dimensionar o impacto social e epidemiológico das descargas. Um estudo pioneiro analisou vítimas fatais e não fatais entre 2000 e 2009, identificando padrões sazonais, demográficos e regionais: predominância de acidentes fatais em áreas rurais (61 %), vitimização de homens jovens (81 %) e ocorrências associadas a atividades agrícolas e à ausência de estruturas de proteção, fornecendo subsídios para recomendações de segurança adaptadas à realidade brasileira (CARDOSO et al., 2014).

Pesquisas posteriores revelam que desigualdades socioeconômicas e regionais agravam a vulnerabilidade da população: alta densidade de raios, forte sazonalidade das chuvas, expansão urbana desordenada e restrito acesso à informação e a edificações seguras resultam em um padrão epidemiológico marcado por vítimas predominantemente masculinas em idade produtiva, elevada letalidade em zonas rurais e disparidades regionais (DE SOUZA et al., 2022; MARTINHO et al., 2024).

Diante das lacunas quanto à relação entre letalidade por raios, variáveis sociodemográficas, fatores de risco, padrões espaço-temporais e desigualdades estruturais, este estudo tem por objetivo analisar os padrões epidemiológicos de mortalidade por descargas elétricas no Brasil e no mundo, sob uma perspectiva interdisciplinar que integra ciências ambientais e saúde pública.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Breve História dos Raios: da Mitologia aos Fundamentos Científicos

Presentes na Terra desde antes da existência humana, os raios desempenharam um importante papel na evolução da civilização, especialmente por introduzirem o fogo como ferramenta essencial. Inicialmente envolto em mistério, o fenômeno foi interpretado ao longo de milênios por meio de mitos e narrativas sobrenaturais, frequentemente atribuídas à ira de divindades poderosas, como Zeus, na Grécia; Thor, na Escandinávia; e Indra, na Índia (COORAY, 2015). Essas representações mitológicas não apenas expressavam o temor humano diante da natureza destrutiva dos raios, mas também refletiam tentativas primitivas de explicar racionalmente eventos até então incompreendidos.

O longo processo de transição entre explicações mitológicas e interpretações científicas foi marcado por abordagens naturalistas que, embora rudimentares, representaram uma ruptura significativa com a visão sobrenatural. Sócrates, no século V a.C., associou os raios a rajadas de vento aprisionadas nas nuvens; Aristóteles, no século IV a.C., propôs que uma substância invisível, gerada pelo calor da Terra, ascendia às nuvens e provocava o fenômeno; e, no século XVII, Descartes sugeriu que os raios eram causados por vibrações atmosféricas (COORAY, 2015).

Foi somente no século XVIII que os estudos sobre raios passaram a se desenvolver com base científica. Em 1752, Benjamin Franklin realizou um experimento pioneiro em *Marly-la-Ville*, na França, demonstrando de forma inequívoca a natureza elétrica das descargas atmosféricas ao captar faíscas com uma haste metálica isolada — experimento posteriormente repetido com sucesso utilizando uma pipa. Além de desmistificar o fenômeno, Franklin também desenvolveu o primeiro sistema eficaz de proteção contra raios, o para-raios Franklin, cuja eficiência foi comprovada em 1777 na Torre de Siena, na Itália (COORAY, 2015).

No século seguinte, surgiram os primeiros relatos clínicos detalhados sobre vítimas de raios, com destaque para o trabalho pioneiro do Dr. Mackintosh, em 1864, que documentou sintomas neurológicos, queimaduras características e a magnetização de objetos metálicos próximos às vítimas. Essas observações iniciais alertaram para os riscos de buscar abrigo inadequado durante tempestades, contribuindo significativamente para o entendimento clínico e preventivo do fenômeno (MACKINTOSH, 1864).

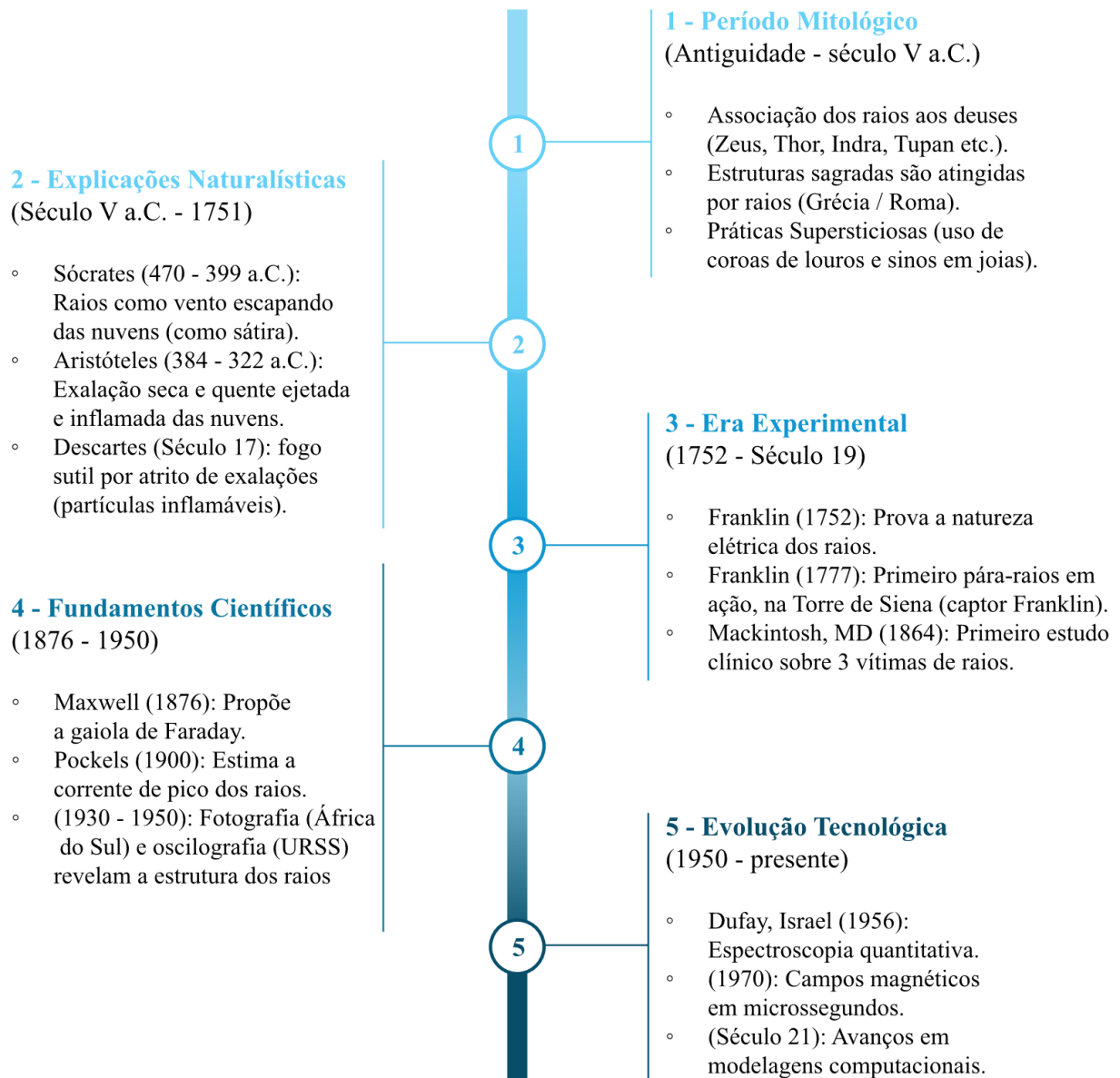
O progresso tecnológico no final do século XIX possibilitou o surgimento de novas abordagens para investigação científica. Em 1869, Herschel utilizou a espectroscopia para revelar pela primeira vez a composição química das descargas, identificando elementos por meio das linhas espectrais emitidas. Pouco depois, em 1888, Hoffert aplicou técnicas fotográficas avançadas que permitiram capturar múltiplos flashes sucessivos em uma mesma descarga, revelando a complexidade dinâmica e a estrutura temporal do fenômeno (HERSCHEL, 1869; HOFFERT, 1888).

Nesse mesmo período, James Clerk Maxwell propôs, em 1876, a “gaiola de Faraday” como um complemento aos sistemas de proteção existentes — uma estrutura metálica fechada capaz de dissipar correntes elétricas pela superfície externa, reduzindo substancialmente os riscos associados às descargas atmosféricas. Atualmente, os sistemas modernos de proteção combinam frequentemente as soluções desenvolvidas por Franklin e Maxwell (RAKOV; UMAN, 2003).

Esses avanços foram determinantes para os progressos subsequentes, que culminaram em estudos mais aprofundados realizados na década de 1930, especialmente na África do Sul, os quais elucidaram a dinâmica das descargas negativas e estabeleceram as bases dos modelos físicos modernos sobre raios. Também se destaca a contribuição de C.T.R. Wilson, que, em 1927, desenvolveu a *câmara de nuvens* para medição de campos eletrostáticos, instrumento fundamental para a compreensão contemporânea do fenômeno (RAKOV; UMAN, 2003).

A Figura 1 apresenta uma síntese dos principais marcos históricos das pesquisas científicas sobre os raios, ilustrando a evolução gradual das percepções humanas, desde os tempos mitológicos até os avanços científicos da atualidade.

Figura 1 - Linha do tempo apresentando os principais marcos históricos das pesquisas com raios, da antiguidade aos dias atuais.



Fonte: O autor (adaptado de Rakov, 2003 e Cooray, 2015).

2.2. Formação de Tempestades

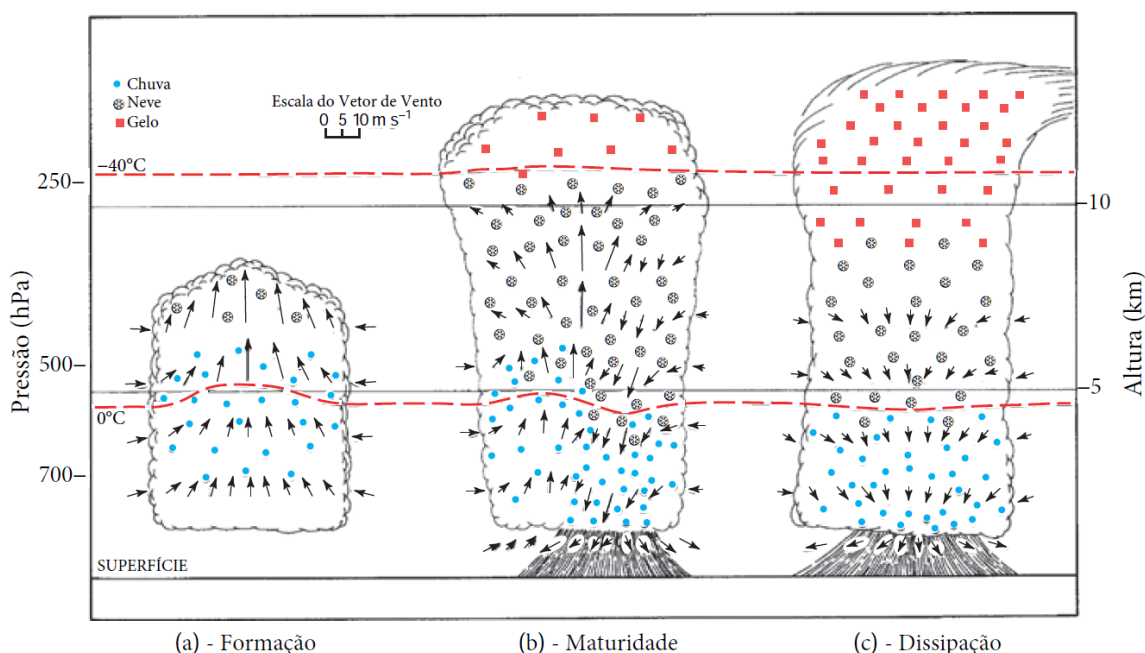
As tempestades são fenômenos meteorológicos resultantes da formação e do desenvolvimento de nuvens cumulonimbus, caracterizadas por fortes correntes ascendentes, instabilidade atmosférica e elevada umidade do ar. Esses fenômenos desempenham um papel essencial na ocorrência das descargas elétricas atmosféricas, ou raios.

A formação das tempestades inicia-se geralmente em regiões de forte instabilidade atmosférica, condição que pode ser gerada tanto por levantamento convectivo, decorrente do

aquecimento da superfície terrestre e da convergência de ventos, quanto por levantamento forçado, associado à passagem de frentes frias e ao relevo irregular do terreno. À medida que o ar úmido ascende, ocorre seu resfriamento adiabático, resultante da expansão devido à diminuição da pressão atmosférica. Ao atingir o ponto de orvalho, inicia-se a condensação do vapor de água, formando as gotas que compõem a nuvem cumuliforme (BARRY; CHORLEY, 2009; WALLACE; HOBBS, 2006)

O desenvolvimento das tempestades ocorre tipicamente em três estágios distintos. No primeiro estágio, denominado estágio de formação (*Cumulus*), predominam correntes ascendentes intensas, responsáveis pela condensação inicial do vapor de água e pelo crescimento vertical da nuvem. No segundo estágio, denominado maturidade, coexistem correntes ascendentes e descendentes, iniciando-se a precipitação, geralmente acompanhada por ventos fortes, trovoadas e frequentes descargas atmosféricas. No último estágio, chamado dissipação, as correntes descendentes predominam, interrompendo a alimentação da nuvem e levando à sua desorganização e dissipação gradual (WALLACE; HOBBS, 2006). A Figura 2 apresenta esquematicamente os três estágios do ciclo de vida das nuvens cumulonimbus.

Figura 2 - Ciclo de vida de uma nuvem de tempestade (*cumulonimbus*).



Fonte: Adaptado (WALLACE; HOBBS, 2006).

A eletrificação das tempestades é um fenômeno complexo que ocorre a partir da interação entre partículas de gelo (cristais e graupel) presentes na nuvem, por meio do

mecanismo de colisão entre gelo e graupel (*ice-graupel collision mechanism*). Neste processo, partículas menores de gelo são carregadas positivamente e transportadas por correntes ascendentes, enquanto graupéis maiores adquirem cargas negativas e são transportados para regiões inferiores pelas correntes descendentes, criando áreas eletricamente carregadas no interior das nuvens. A intensidade e a distribuição dessas cargas elétricas dependem significativamente das propriedades termodinâmicas e dinâmicas das tempestades, como a velocidade das correntes ascendentes e a quantidade de partículas de gelo presentes. Em regiões tropicais e subtropicais, onde essas condições são mais pronunciadas, tempestades particularmente intensas geram campos elétricos elevados, aumentando consideravelmente a frequência e a intensidade das descargas atmosféricas (COORAY, 2015; LIVANOV, 2023).

2.3. A Física dos Raios

A ocorrência de raios está relacionada à eletrificação das tempestades, por meio da dinâmica de separação e acúmulo de cargas elétricas no interior de nuvens do tipo *cumulonimbus*, em especial na região mista onde coexistem cristais de gelo e água super-resfriada. Esse processo de eletrificação promove campos elétricos intensos, os quais viabilizam a formação de canais ionizados (plasma) que constituem o caminho para a descarga atmosférica (GOMES, 2021; MAZUR, 2016).

Em linhas gerais, o relâmpago desenvolve-se por meio de um líder – uma espécie de canal em crescimento que pode se propagar em passos (*stepped leader*) ou de forma contínua (*dart leader*) – até conectar-se ao solo ou a outras regiões da nuvem com polaridade oposta, culminando em um pulso de corrente abrupto denominado “retorno” (*return stroke*). Esse retorno carrega elevadas magnitudes de corrente (dezenas a centenas de quilo-ampères) e produz o clarão luminoso e a onda de choque que ouvimos como trovão (MAZUR, 2016).

Ao longo do líder, são depositadas cargas elétricas que, posteriormente, são neutralizadas pelo retorno. Nesse processo, o canal do raio comporta-se como um guia ionizado de alta condutividade e temperatura, frequentemente acima de 20.000 K. Em razão da corrente intensa e da rápida taxa de variação (di/dt), surgem também campos eletromagnéticos radiados, capazes de induzir sobretensões a quilômetros de distância do ponto de impacto. O pulso de corrente inicial pode ser seguido por sucessivos pulsos (subsequentes retornos), cada qual precedido por um novo líder que se propaga ao longo do canal já estabelecido ou, eventualmente, desviando-se para um novo caminho. Fenômenos adicionais, como as correntes

contínuas (*continuing current*) e os pulsos intermediários (*M-components*), também podem ocorrer na mesma descarga, tornando sua evolução altamente complexa (GOMES, 2021; HOOLE; HOOLE, 2022).

Nas descargas entre nuvem e solo (*CG flashes*), a forma mais comum envolve a transferência de carga negativa para a terra, embora descargas positivas também ocorram, podendo apresentar valores de pico de corrente ainda mais elevados e maior capacidade destrutiva. Tanto o caminho percorrido pelo líder quanto a intensidade da corrente resultam de mecanismos de realimentação de cargas nas camadas da nuvem e do equilíbrio temporário do canal ionizado. Assim, o estudo de sua física requer a integração de dados de laboratório (descargas em longos intervalos de ar), medições de campo (sobretudo de corrente e de campos eletromagnéticos) e modelagem computacional para a compreensão dos diferentes estágios do fenômeno (GOMES, 2021; HOOLE; HOOLE, 2022; MAZUR, 2016).

2.4. Instrumentos de Detecção e Medição de Raios

A quantificação dos parâmetros físicos associados aos raios (como campo elétrico, campo magnético, corrente e localização geográfica das descargas) é essencial para o entendimento de sua dinâmica, aprimoramento de modelos e desenvolvimento de medidas de proteção. Diversas técnicas e equipamentos foram criados e refinados ao longo das últimas décadas, abrangendo métodos de monitoramento direto, como, por exemplo, sistemas instalados em torres ou experimentos com raios induzidos artificialmente, e métodos de sensoriamento remoto (baseados em medidas de campos eletromagnéticos e sistemas de localização) (COORAY, 2015; GOMES, 2021; RAKOV; UMAN, 2003).

Um dos métodos mais consagrados para detecção remota de raios consiste na medição dos campos elétricos ou magnéticos radiados durante a descarga atmosférica, utilizando antenas e circuitos de aquisição de dados de alta velocidade. As chamadas “antenas de campo elétrico” (*flat-plate* ou de tipo placa) e “antenas de campo magnético” (*loop* ou de ferrita) captam os sinais transitórios no solo, permitindo estimar a intensidade e a forma de onda dos pulsos associados a líderes e retornos. Em configurações avançadas, denominadas *slow antenna* e *fast antenna*, registra-se respectivamente a variação lenta (quase DC) e a variação rápida (na ordem de microssegundos) do campo, possibilitando distinguir fenômenos como descargas preliminares (pré-líder), pulsos de líder escalonado e frentes abruptas de correntes de retorno. Além disso, sensores de correlação de fase e interferometria em rádio frequência fornecem

imagens em alta resolução da evolução espacial do canal, sobretudo dentro da nuvem (COORAY, 2015; RAKOV; UMAN, 2003).

Para identificação do ponto de impacto no solo e estimativa de taxas de incidência, implementam-se redes de localização de raios (*Lightning Location Systems – LLS*), que empregam métodos como *time-of-arrival (TOA)*, *magnetic direction finding (MDF)* ou combinações híbridas. Esses sistemas detectam, em múltiplas estações, o instante de chegada ou a direção dos pulsos de campo produzidos pelos retornos, calculando assim latitude/longitude do evento (RAKOV; UMAN, 2003). Em paralelo, métodos ópticos (inclusive satélites com imageadores de relâmpagos) têm ampliado a abrangência global do monitoramento, contribuindo para construção de mapas de densidade de raios e avaliação de tendências relacionadas ao clima .

Quanto à medição direta da corrente do raio, destacam-se as torres instrumentadas (por exemplo, em Monte San Salvatore, na Suíça) e os experimentos de raios induzidos artificialmente por foguetes, nos quais um fio metálico, conectado ao solo, é lançado em direção à nuvem para forçar a descarga. Nessas instalações, o canal do raio encontra trajetória direta até um sensor de corrente, abrindo a possibilidade de registrar, com alta precisão, valores de pico, forma de onda e carga total transferida. Tais medições alimentam pesquisas sobre picos de corrente, taxas de variação di/dt e durações de pulsos, parâmetros fundamentais para dimensionamento de dispositivos de proteção contra surtos e avaliação de riscos. Nesse contexto, o uso de resistências de baixa indutância (*shunts*) ou bobinas Rogowski (*Rogowski coils*) conectados a sistemas de aquisição de banda larga permite registrar, em tempo real, as etapas de avanço do líder, a corrente de retorno e eventuais correntes contínuas (*continuing current*) e componentes intermediárias (*M-components*) (GOMES, 2021).

Esses diversos instrumentos e técnicas de detecção e medição de raios atuam de modo complementar:

- Antenas de campo elétrico e magnético (sensoriamento remoto): permitem monitorar raios a médias e grandes distâncias, distinguindo pulsos rápidos (retornos) e variações lentas (correntes contínuas);
- Redes de localização de raios (*LLS*): possibilitam estimar a posição de impacto no solo e mapear a distribuição espaço-temporal de raios em escalas regionais ou globais;
- Torres instrumentadas e raios induzidos artificialmente: visam medir diretamente a corrente e outros parâmetros do canal, ofertando dados confiáveis para validar modelos e subsidiar normas de proteção;

- Métodos ópticos e interferométricos: oferecem imagens em alta definição da trajetória do canal e suas ramificações, viabilizando análises mais pormenorizadas da física do raio dentro e fora da nuvem.

2.5. Incidência de Raios no Mundo e no Brasil

A incidência de raios no Mundo e no Brasil está diretamente relacionada a fatores climáticos, ambientais e sociais. Globalmente, as regiões tropicais, devido à alta umidade e forte atividade convectiva, apresentam elevada frequência de raios (PINTO JÚNIOR et al., 2013). No Brasil, essa incidência é monitorada por sistemas avançados como o *ENTLN - EarthNetworks Total Lightning Networks*, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (PINTO JR. et al., 2013, 2015).

Estudos recentes demonstram que a incidência de raios está fortemente ligada à urbanização e à poluição atmosférica, que podem influenciar os padrões meteorológicos locais e amplificar a intensidade das tempestades. A urbanização, por meio do fenômeno conhecido como *Ilha de Calor Urbana (Urban Heat Island - UHI)*, pode aumentar a incidência e a intensidade dos raios nas áreas metropolitanas. Essa intensificação ocorre devido ao aquecimento diferencial da superfície terrestre, modificando a dinâmica da atmosfera local, favorecendo a ocorrência de tempestades mais intensas, especialmente nas grandes cidades, como São Paulo e Manaus. (BOURSCHEIDT et al, 2016; PINTO JR. et al., 2013)

No Brasil, a maior incidência de raios é registrada nas regiões Norte e Centro-Oeste, associadas às intensas atividades convectivas e à proximidade da Amazônia, considerada uma das três *chaminés globais de raios* do mundo. Manaus, especificamente, apresenta uma incidência de raios significativamente superior às áreas circundantes, correlacionada diretamente com o crescimento urbano e o efeito da ilha de calor (PINTO JR. et al., 2013).

Os acidentes com raios também possuem uma dimensão epidemiológica significativa no Brasil, influenciados por fatores socioeconômicos e geográficos. A maior parte dos acidentes fatais ocorre em áreas rurais (61%), com atividades agrícolas e situações de exposição ao ar livre sendo predominantes. O padrão sazonal também é importante, concentrando-se principalmente no verão, período em que 45% das fatalidades são registradas. As diferenças regionais também são expressivas, com estados como Tocantins e Mato Grosso do Sul apresentando taxas de mortalidade muito acima da média nacional (CARDOSO et al., 2014).

A conscientização sobre os riscos, juntamente com a implementação de infraestruturas adequadas de proteção contra raios, são fundamentais para reduzir o impacto desses eventos naturais sobre a população brasileira.(CARDOSO et al., 2014; PINTO JR. et al., 2015).

2.6. Danos e Vítimas por Raios

Os danos provocados por raios configuram uma preocupação relevante nas esferas da segurança pública, da engenharia e da saúde. Os raios são responsáveis por diversos tipos de prejuízos, que vão desde impactos diretos sobre estruturas e sistemas elétricos até consequências severas à integridade física e mental das pessoas. Estima-se que, em escala global, milhares de injúrias e mortes sejam atribuídas anualmente a esse tipo de fenômeno, exigindo estratégias de mitigação que integrem dimensões físicas, médicas e socioeconômicas. (COOPER; HOLLE, 2019).

Os ferimentos provocados por raios apresentam ampla variedade de manifestações clínicas, incluindo queimaduras, arritmias, parada cardíaca, comprometimentos neurológicos e sequelas permanentes — mesmo em casos em que a exposição não leva à morte imediata. Para além dos ferimentos graves, sobreviventes frequentemente enfrentam longos processos de reabilitação, transtornos psicológicos e distúrbios neurológicos persistentes. Esses efeitos são particularmente agravados em países em desenvolvimento, nos quais a precariedade da infraestrutura, a baixa adesão a normas técnicas de segurança e a carência de serviços de emergência dificultam a prevenção e o tratamento adequado dos acidentes. (COOPER; HOLLE, 2019; GOMES, 2021).

Além dos ferimentos individuais, os raios também podem causar prejuízos coletivos e estruturais, como interrupções em redes de energia e telecomunicações, incêndios e perdas econômicas diretas. Esses efeitos são mais recorrentes em regiões com baixa cobertura de para-raios, ausência de sistemas de aterramento e escassa implementação de políticas públicas voltadas à proteção contra descargas atmosféricas (GOMES, 2021).

Quanto às vítimas humanas, estudos epidemiológicos nacionais e internacionais apontam perfis consistentes. Homens adultos jovens representam a maioria dos casos, especialmente em áreas rurais ou durante atividades ao ar livre. O risco de ocorrência também varia sazonalmente, sendo mais elevado durante períodos de instabilidade atmosférica, como as estações chuvosas e os meses de verão. A ocupação profissional, a exposição prolongada ao ambiente externo e o desconhecimento de medidas preventivas figuram entre os principais

fatores associados ao aumento da incidência de acidentes fatais (COOPER; HOLLE, 2019; GOMES, 2021).

No Brasil, estudos recentes sistematizaram dados sobre acidentes com raios na última década, revelando que a maioria das fatalidades ocorre em áreas periféricas ou desassistidas, com baixos índices de proteção estrutural e acesso limitado à informação (SOUZA et al., 2022, 2023; MARTINHO et al., 2024).

2.7. Mecanismos de Acidentes com Raios e Efeitos no Corpo Humano

Os acidentes com raios, ilustrados na Figura 3, podem resultar em diversos tipos de ferimentos decorrentes de múltiplos mecanismos. Esses mecanismos são geralmente classificados em seis categorias principais (COOPER; HOLLE, 2019; GOMES, 2021):

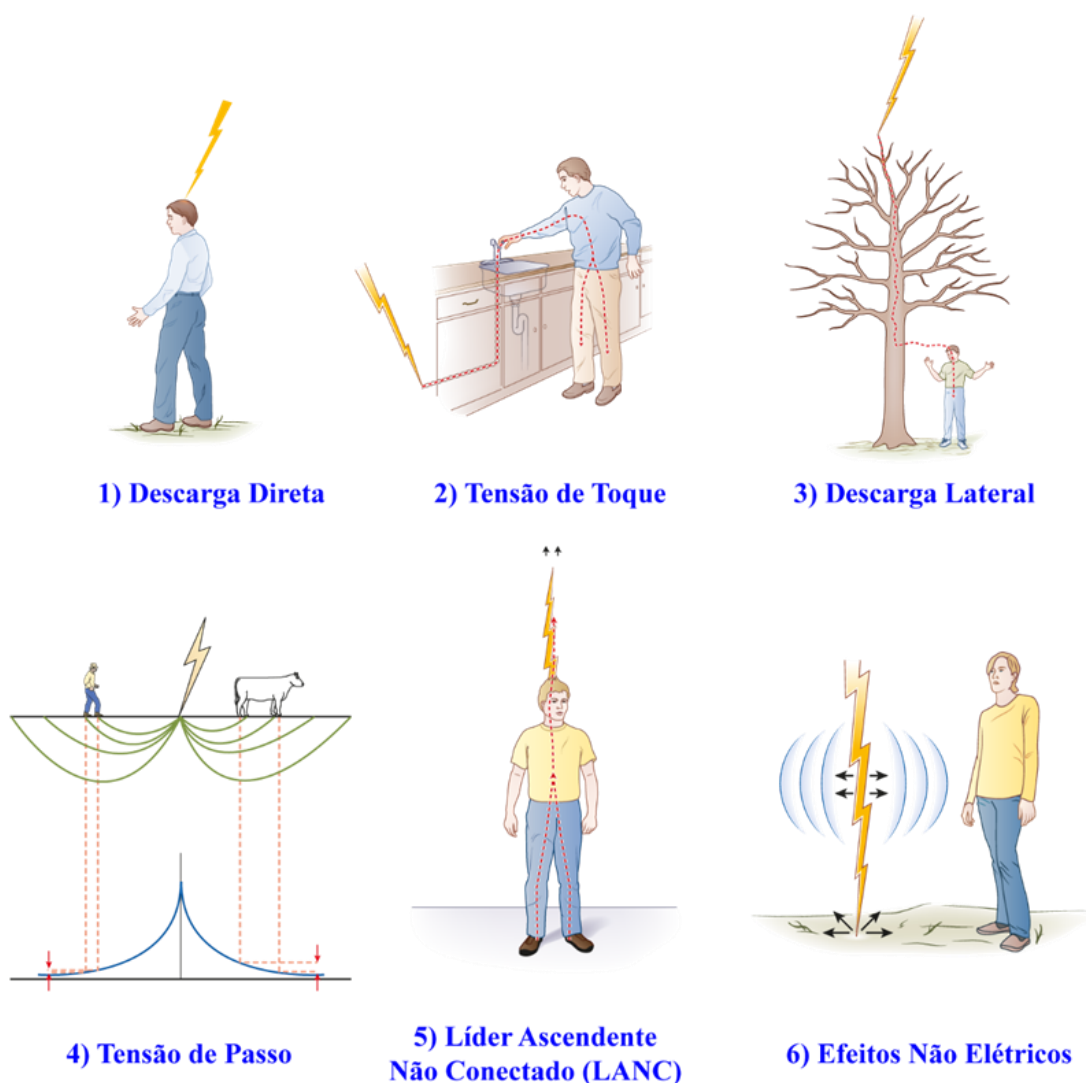
1. Descarga Direta (*direct strike*): ocorre quando o canal principal do raio atinge diretamente o corpo da vítima, permitindo a passagem de uma corrente elétrica de alta intensidade. Apesar de ser o tipo menos frequente, é o que apresenta maior potencial lesivo, provocando queimaduras extensas, danos ao sistema cardiovascular e neurológico, além de parada cardiorrespiratória em muitos casos. (COOPER, 2012; COORAY et al., 2007; LICHTENBERG et al., 1993; OKAFOR, 2005; SHIPMAN et al., 2020).
2. Tensão de Toque (*touch voltage*): esse mecanismo ocorre quando a corrente elétrica proveniente de um objeto atingido pelo raio se propaga para uma pessoa em contato com esse objeto. Mesmo sem contato direto com o raio, a vítima pode sofrer queimaduras, contrações musculares e comprometimentos de órgãos internos. (ANDREWS, 1992; KOUMBOURLIS, 2002; RITENOUR et al., 2008).
3. Descarga Lateral (*Side Flash*): nesse caso, o raio atinge um objeto próximo à vítima e a corrente elétrica “salta” lateralmente até o corpo humano, provocando lesões elétricas de intensidade variável. As lesões incluem queimaduras e distúrbios neurológicos, ainda que, em geral, sejam menos graves do que as provocadas por uma descarga direta. (ALYAN et al., 2006; EDLICH et al., 2005; JITSUIKI et al., 2020).
4. Tensão de Passo (*Step Voltage*): após uma descarga atmosférica, a corrente elétrica se espalha pelo solo, gerando uma diferença de potencial entre pontos distantes, como entre os pés de uma pessoa. Essa diferença pode induzir a passagem de corrente elétrica

através do corpo, afetando o sistema nervoso e cardiovascular e gerando queimaduras, conforme a magnitude da tensão e a posição da vítima. (ANDERSON, 2001; BIER et al., 2005; O'KEEFE GATEWOOD; ZANE, 2004).

5. Líder Ascendente Não Conectado (*Unconnected Upward Leader – UUL* ou LANC): durante o desenvolvimento de uma descarga atmosférica, pode-se formar um líder ascendente a partir do corpo da vítima, mesmo sem conexão com o canal principal do raio. A corrente induzida por esse processo pode causar lesões superficiais e internas que, muitas vezes, não são explicadas pelos mecanismos clássicos de impacto. (ANDERSON, 2001; BECERRA; COORAY, 2009; COOPER, 2002; CUMMINS et al., 2018).

6. Barotrauma (ou mecanismo não elétrico): além dos efeitos elétricos, o aquecimento súbito do canal do relâmpago gera uma onda de choque — uma sobrepressão — que se propaga pelo ar. Essa onda pode causar lesões mecânicas semelhantes às de explosões, como fraturas, rompimento de membranas timpânicas e contusões pulmonares, atuando como um mecanismo complementar aos efeitos eletrotérmicos. (BLUMENTHAL; WEST, 2015; COOPER, 2012).

Figura 3 - Representação dos seis mecanismos de acidentes com raios.



Fonte: Adaptado de Cooper e Holle (2019).

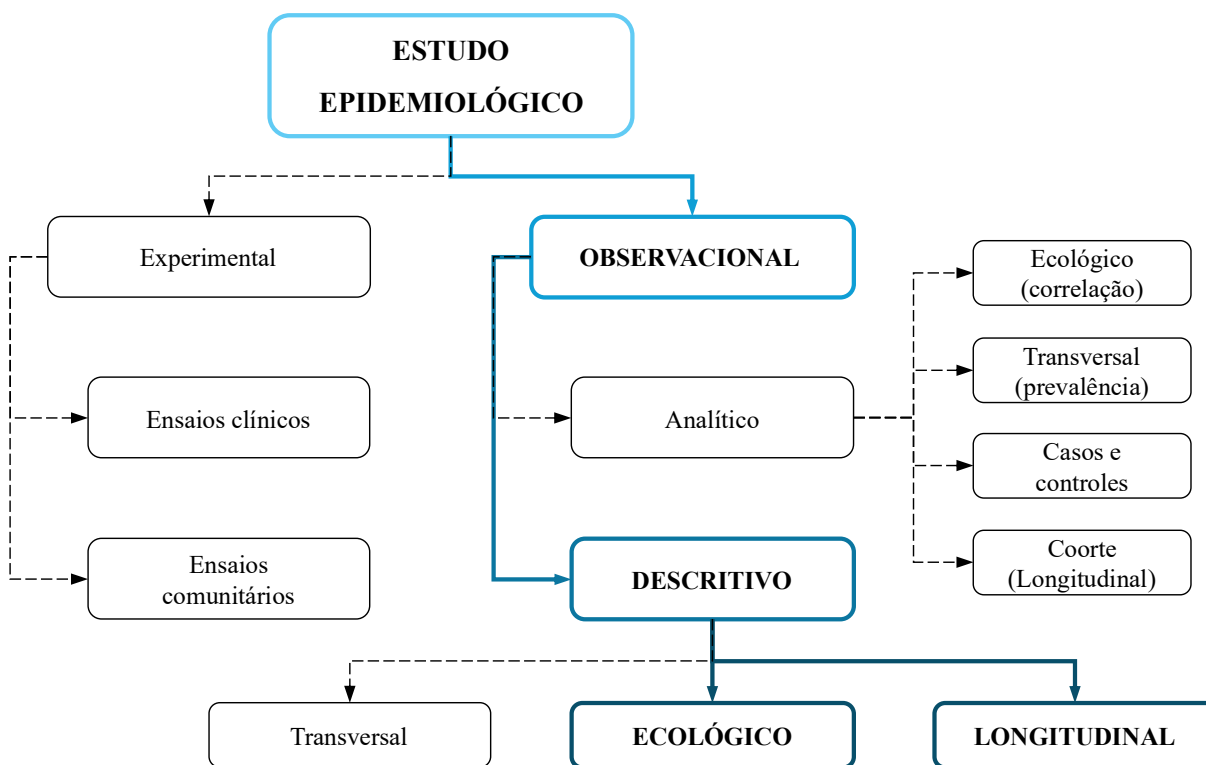
2.8. Epidemiologia e Índices Epidemiológicos

A epidemiologia é o ramo das ciências da saúde dedicado ao estudo da distribuição, dos fatores determinantes e dos desfechos dos agravos à saúde em populações humanas. Seu principal objetivo é subsidiar ações de prevenção, controle e promoção da saúde pública, com base na análise de padrões de ocorrência de doenças e eventos relacionados à saúde (BEAGLEHOLE et al., 2010).

De acordo com a classificação dos desenhos epidemiológicos, o presente estudo pode ser caracterizado como observacional, descritivo, ecológico e longitudinal. Trata-se de um estudo do tipo agregado, pois utiliza como unidade de análise dados populacionais consolidados

por município, estado e região, em vez de informações individuais. Adicionalmente, é classificado como longitudinal por analisar dados referentes a um período de 25 anos (1998 a 2022), o que possibilita a observação de tendências e variações temporais dos agravos relacionados a raios. Como estudo observacional, não há qualquer intervenção dos pesquisadores sobre as variáveis analisadas, limitando-se à coleta e à análise de dados secundários. A Figura 4 ilustra esquematicamente a posição ocupada por este estudo na matriz dos principais desenhos epidemiológicos. (BRASIL, 2022a, 2022b; IBGE, 2023a, 2023b; PNUD, 2024).

Figura 4 – Localização do presente estudo na matriz dos principais desenhos epidemiológicos.



Fonte: O autor. Adaptado Beaglehole et al. (2010).

As medidas utilizadas para a análise da frequência dos agravos foram os seguintes índices epidemiológicos:

1. Taxa de Morbidade: expressa o total de vítimas de raios (fatais e não fatais) em uma população, funcionando como indicador da carga geral do agravo.

$$\text{Taxa de Morbidade} = \frac{\text{Vítimas Não Fatais} + \text{Vítimas Fatais}}{\text{População}} * 100.000 \quad [\text{Eq. 1}]$$

2. Taxa de Mortalidade: mensura o risco de óbito por raios na população analisada.

$$\text{Taxa de Mortalidade} = \frac{\text{Vítimas Fatais}}{\text{População}} * 100.000 \quad [\text{Eq. 2}]$$

3. Índice de Letalidade (%): reflete a gravidade do agravo, indicando a proporção de vítimas fatais em relação ao total de atingidos.

$$\text{Índice de Letalidade (\%)} = \frac{\text{Vítimas Fatais}}{\text{Vítimas Não Fatais} + \text{Vítimas Fatais}} * 100\% \quad [\text{Eq. 3}]$$

Essas métricas foram calculadas com base nos dados de hospitalizações e óbitos, ambos referentes ao período de 1998 a 2022, disponibilizados pelo DataSUS, e utilizando o código X33 - vítima de raio (segundo a classificação do CID-10). (BRÄMER, 1988; BRASIL, 2022a, 2022b).

A utilização de estudos ecológicos é adequada para avaliar relações entre variáveis ambientais, socioeconômicas e sanitárias em larga escala. Embora esse tipo de abordagem não permita inferências causais em nível individual, ela é amplamente empregada em análises geográficas em saúde. Neste estudo, essa metodologia contribui para a compreensão dos padrões regionais e temporais da mortalidade e morbidade associadas a raios no Brasil.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi conduzida com dados que abrangem todo o território brasileiro, no período de 25 anos (1998 a 2022), com foco na análise temporal, espacial e sociodemográfica das vítimas de raios. Para isso, foram utilizadas bases de dados secundários nacionais e internacionais (Tabela 1), selecionadas conforme os objetivos específicos do estudo.

Os dados brasileiros foram obtidos a partir de fontes institucionais confiáveis e contemplam registros hospitalares e de mortalidade, além de indicadores climáticos, demográficos e socioeconômicos. Essas informações foram organizadas e tratadas de acordo com critérios metodológicos compatíveis com a abordagem epidemiológica adotada. Adicionalmente, a pesquisa incorporou dados de diferentes períodos provenientes de outros países, utilizados no escopo da Revisão Sistemática de Literatura.

Tabela 1 – Descrição e referência dos bancos de dados utilizados no presente estudo.

Banco de Dados	Descrição	Referência
Sistema de Informações Hospitalares (SIH/SUS)	Banco de dados de hospitalizações de vítimas de raios no Brasil. Período: Janeiro de 1998 a Dezembro de 2022. Filtro: Códigos do CID-10: “T75.0” e “X33”.	(BRASIL, 2022a)
Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM/SUS)	Banco de dados de óbitos das vítimas de raios no Brasil. Período: Janeiro de 1998 a Dezembro de 2022. Filtro: Códigos do CID-10: “X33”.	(BRASIL, 2022b)
Estimativas Populacionais e Censo Demográfico (IBGE)	População (habitantes) e área (km ²) dos Estados e Regiões do Brasil. Período: 1998 a 2022.	(IBGE, 2023a, 2023b)
Índice de Desenvolvimento Humano (PNUD/IBGE)	Série histórica do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos Estados e Regiões do Brasil. Período: 2000 a 2021.	(PNUD, 2024)
Densidade de Raios (TRMM/LIS e INPE).	Densidade de raios (raios/km ² /ano) revisada para o Brasil com base na metodologia do INPE.	(BLAKESLEE, 2021; NACCARATO et al., 2022)
Estimativas Populacionais dos países identificados na Revisão Sistemática de Literatura	Foram utilizadas diversas fontes internacionais: The World Bank; ISTAT; U.S. Census Bureau, Statistics Canada, NSO Malawi, Índia Online Pages.	---

3.1. Revisão sistemática da literatura sobre relatórios das vítimas de raios no mundo

Esta seção apresenta a revisão sistemática da literatura (RSL) sobre estudos internacionais que relataram vítimas de raios, com o objetivo de identificar dados comparáveis de letalidade. A primeira etapa consistiu na definição das palavras-chave apropriadas para a busca, seguida pelo rastreamento e identificação das publicações elegíveis para responder à questão de pesquisa. O procedimento adotado permitiu a recuperação e análise estruturada dos estudos mais relevantes sobre o tema.

A RSL é uma metodologia reconhecida por sua sistematização na coleta, análise e interpretação de informações científicas, baseada em critérios explícitos e reproduzíveis. Esse método é amplamente utilizado para garantir rigor metodológico e minimizar vieses na seleção de estudos (HIGGINS et al., 2019; MARCOS-PABLOS; GARCÍA-PEÑALVO, 2018).

A primeira ação consistiu na definição de uma combinação de palavras-chave específicas para garantir a recuperação de publicações relacionadas ao tema central da pesquisa. Essa etapa, essencial em qualquer RSL, foi conduzida segundo o método iterativo sugerido por Marcos-Pablos e García-Peñalvo, o qual orienta a seleção sistemática e refinada de descritores (MERGEL et al., 2015; MARCOS-PABLOS; GARCÍA-PEÑALVO, 2018).

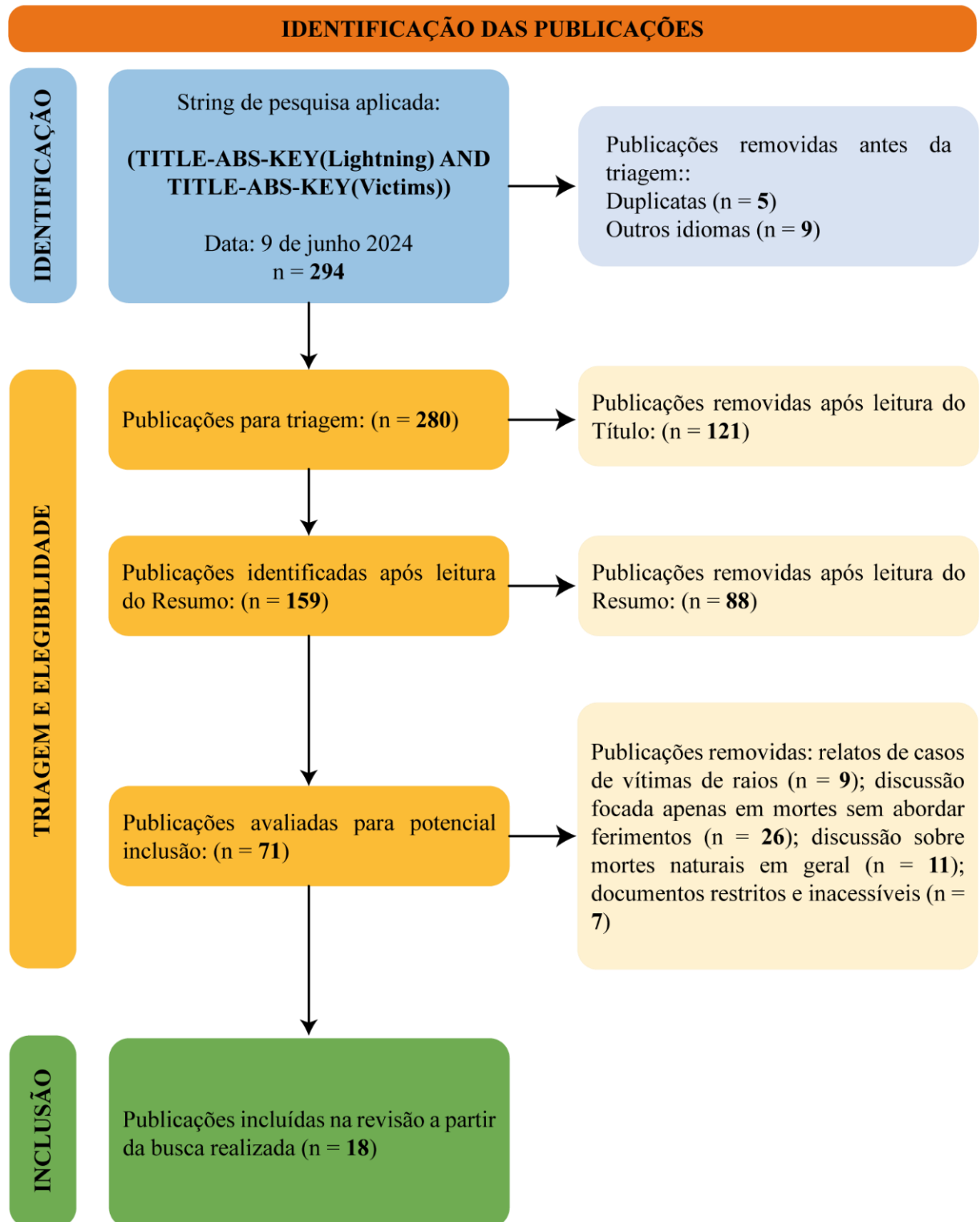
Optou-se pelo termo “*lightning*” por ser a palavra-chave central ao fenômeno físico em estudo. Simultaneamente, o termo “*victims*” foi selecionado por abranger diferentes categorias de atingidos por raios, tanto fatais quanto não fatais. Essa escolha visou ampliar o escopo da busca, aumentando a probabilidade de identificar estudos epidemiológicos relevantes. A *string* de busca final foi definida como:

(TITLE-ABS-KEY (*Lightning*) AND TITLE-ABS-KEY (*Victims*))

A escolha da base de dados recaiu sobre a plataforma Scopus, considerada a mais abrangente em número de periódicos e amplitude temática, conforme evidenciado em análises anteriores. A Scopus também oferece vantagens adicionais, como a não recuperação de artigos duplicados e a possibilidade de análise bibliométrica integrada (ADRIAANSE; RENSLEIGH, 2013; FALAGAS et al., 2008).

Para assegurar transparência e reprodutibilidade ao processo, adotou-se o protocolo PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Este framework orienta a elaboração de revisões sistemáticas com foco na clareza, na mitigação de vieses e na padronização dos relatórios científicos. A Figura 5 apresenta o fluxograma PRISMA adaptado para este estudo (MOHER et al., 2009).

Figura 5 - Estrutura do protocolo *PRISMA*, mostrando os resultados da RSL deste estudo. Fonte: O autor.



Com a definição da *string* de busca e da base de dados, foram inicialmente identificadas 294 publicações. Desse total, 14 artigos foram excluídos por duplicidade ou por estarem

disponíveis apenas em idiomas não compatíveis com os critérios do estudo (inglês, espanhol ou português). As 280 publicações remanescentes seguiram para a triagem por título e resumo.

Na etapa de triagem, 121 artigos foram descartados após leitura dos títulos por não tratarem diretamente de vítimas de raios. Outros 88 foram excluídos após leitura dos resumos, por não se enquadrarem nos critérios de inclusão. Por fim, 53 artigos foram removidos por diferentes razões: nove abordavam casos individuais, 26 discutiam apenas fatalidades sem informações sobre sobreviventes, 11 tratavam de causas naturais em geral, e sete eram inacessíveis. Como resultado do processo, foram incluídos 16 artigos científicos para análise detalhada (Tabela 2).

Tabela 2 – Lista de publicações escolhidas na RSL deste estudo, com informações sobre o título, ano de publicação, país e período específico.

Referência	Título do Artigo	País	Período
(SHANKAR et al., 2024)	<i>Incident of lightning-related casualties in Bihar, India: An analysis and vulnerability assessment</i>	Índia (Bihar)	2017-2022 (6 anos)
(LUBASI; GOMES, 2023)	<i>Lightning Accidents in Zambia</i>	Zâmbia	2013-2023 (11 anos)
(PACK; SCHRÖTTNER, 2022)	<i>A 17-year retrospective review of lightning victims in Austria with focus on lightning effects</i>	Áustria (Estíria)	2000-2017 (18 anos)
(EDIRISINGHE; MADURANGA, 2021)	<i>Distribution of Lightning Accidents in Sri Lanka from 1974 to 2019 Using the DesInventar Database</i>	Sri Lanka	1974-2019 (46 anos)
(KULSUM et al., 2021)	<i>Analysis of Spatio-temporal Variation of Lightning Casualties in Bangladesh</i>	Bangladesh	2010-2019 (10 anos)
(KALINDEKAFE et al., 2018)	<i>Lightning Fatalities in Malawi: A retrospective study from 2010 to 2017</i>	Malawi (16 de 28 Distritos)	2010-2017 (8 anos)
(DOLJINSUREN; GOMES, 2016)	<i>Lightning related human casualties in Mongolia</i>	Mongólia	2003-2015 (13 anos)
(HAJIKHANI et al., 2016)	<i>Lightning Fatalities and Injuries in Malaysia from 2008 to 2015</i>	Malásia	2008-2015 (8 anos)
(TILEV-TANRIOVER et al., 2015)	<i>Lightning fatalities and injuries in Turkey</i>	Turquia	1930-2014 (85 anos)
(ELSON; WEBB, 2014)	<i>Deaths and injuries from lightning in the UK, 1988–2012</i>	Reino Unido	1988-2012 (25 anos)
(PEPPAS et al., 2012)	<i>Analysis of lightning impacts in Greece</i>	Grécia	2000-2010 (11 anos)
(MARY; GOMES, 2012)	<i>Lightning accidents in Uganda</i>	Uganda	2007-2011 (5 anos)
(ZHANG et al., 2011)	<i>Lightning casualties and damages in China from 1997 to 2009</i>	China	1997-2009 (13 anos)
(ŁOBODA, 2008)	<i>Lightning Deaths and Injuries in Poland in Period of 2001-2006</i>	Polónia	2001-2006 (6 anos)
(MILLS et al., 2008)	<i>Assessment of lightning-related fatality and injury risk in Canada</i>	Canadá	1994-2005 (12 anos)
(LÓPEZ; HOLLE, 1996)	<i>Fluctuations of Lightning Casualties in the United States: 1959–1990</i>	Estados Unidos	1959-1990 (32 anos)

A RSL permitiu identificar 16 artigos, publicados entre 1996 e 2024, que apresentaram tanto os números de vítimas fatais, com o número de vítimas não fatais, possibilitando então identificar o percentual de mortalidade das vítimas de raio nos diferentes países.

3.2. Análise epidemiológica das vítimas de raios do Brasil

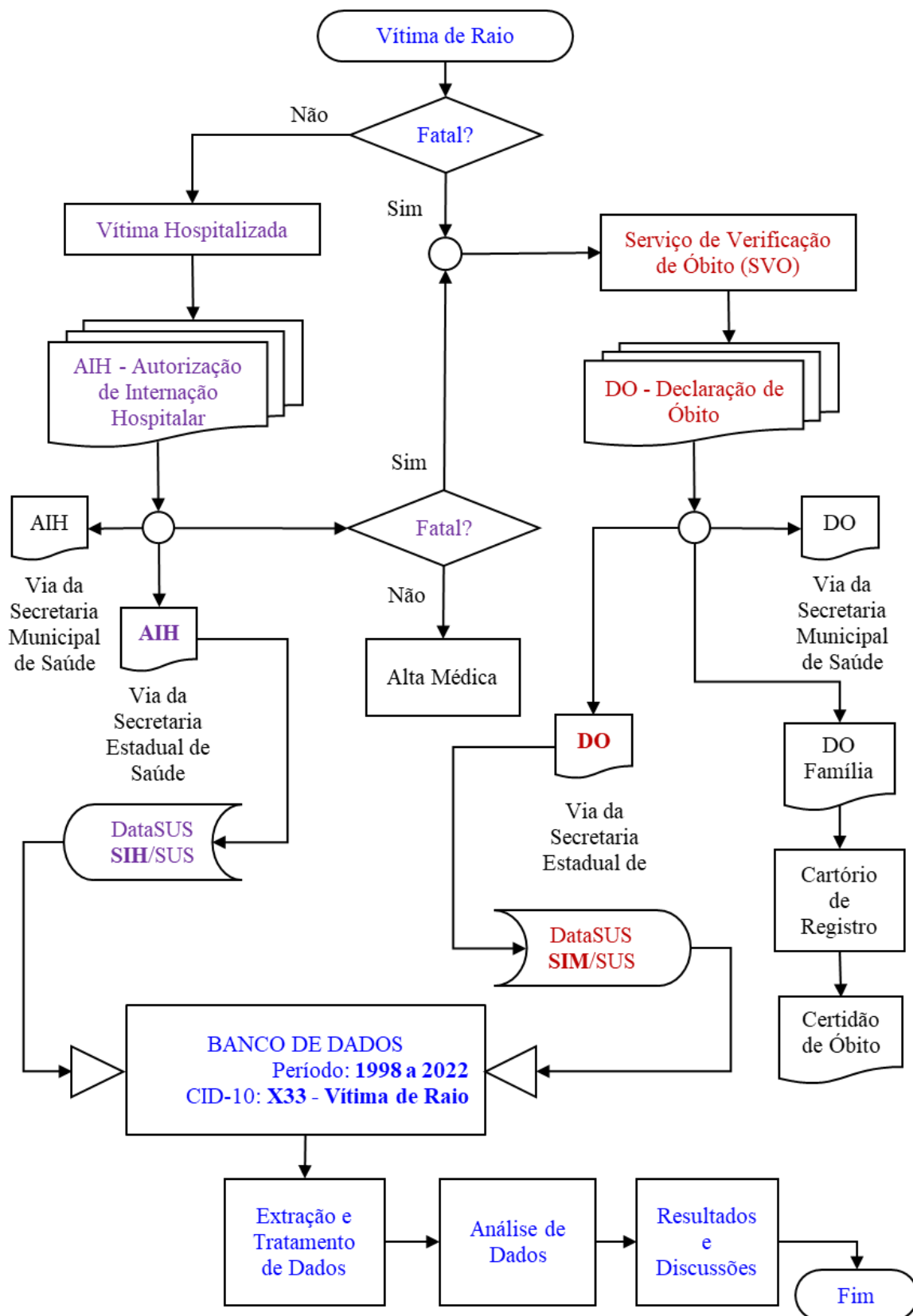
Com o objetivo de estimar o Índice de Letalidade das vítimas de raios no Brasil, este estudo coletou informações referentes a internações hospitalares e mortalidade registradas nos sistemas oficiais do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DataSUS). Esse departamento é responsável por centralizar o desenvolvimento, operação e manutenção dos sistemas nacionais de informação em saúde, promovendo o armazenamento, o processamento e a disseminação dos dados em todo o território brasileiro (PICCOLO, 2018).

A série histórica utilizada abrange um período de 25 anos, compreendido entre 1998 e 2022. Para garantir padronização e comparabilidade, a seleção dos registros seguiu a Classificação Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde (CID-10), sistema adotado mundialmente sob orientação da Organização Mundial da Saúde (OMS). O código utilizado foi o “X33 – vítima de raio”, que identifica os agravos provocados por descargas atmosféricas. (BRÄMER, 1988; BRASIL, 2022a, 2022b).

Os registros de vítimas hospitalizadas por raios foram obtidos por meio das Autorizações de Internação Hospitalar (AIHs), armazenadas no Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH/SUS). Já os dados sobre óbitos foram extraídos das Declarações de Óbito (DOs), integradas ao Sistema de Informações sobre Mortalidade do SUS (SIM/SUS), com base nos registros oficiais de mortalidade (BRASIL, 2022a, 2022b).

O processo de coleta de dados seguiu uma lógica condizente com o funcionamento dos sistemas de informação do SUS, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 6. Inicialmente, verifica-se se o acidente com raio resultou em óbito. Se sim, o caso é registrado por um Serviço de Verificação de Óbito (SVO), que emite a DO. Essa declaração é encaminhada às Secretarias Municipais e Estaduais de Saúde e registrada no SIM/SUS. Também é entregue à família, permitindo a emissão da Certidão de Óbito. Em situações não fatais com necessidade de hospitalização, é gerada uma AIH, registrada no SIH/SUS. Caso a vítima venha a óbito durante a internação, uma DO é emitida e segue o mesmo fluxo. Se houver alta hospitalar, a AIH é encerrada e arquivada no banco de dados.

Figura 6 - Fluxograma do evento (acidente) até a consolidação da base de dados dos sistemas, finalizando com a extração, segmentação, análise de dados e discussão dos resultados. Fonte: O autor.



A quantificação e caracterização das vítimas foi realizada com base na análise dos registros provenientes das AIHs e DOs obtidos do DataSUS. As informações foram organizadas, segmentadas e processadas com vistas a construir um panorama abrangente dos agravos relacionados a raios no Brasil. A análise buscou compreender padrões de morbidade, mortalidade e letalidade à luz de variáveis sociodemográficas, da sazonalidade das chuvas e da densidade mensal e anual de raios por quilômetro quadrado. Esses elementos compõem a base da discussão apresentada na seção de resultados e permitiram a identificação de padrões epidemiológicos relevantes.

3.3. Qualidade dos Dados Utilizados

Para garantir a confiabilidade e comparabilidade de nossas análises, conduzimos uma avaliação sistemática da completude, consistência e potencial viés em cada um dos seis bancos de dados primários (Tabela 1).

Recuperamos 8.100 arquivos mensais de microdados (formato DBC) cobrindo o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2022 (25 anos $\times$ 12 meses $\times$ 27 estados). Os nomes dos arquivos foram analisados para atribuir estado e região. Em cada arquivo, os campos-chave — data de internação (ano, mês, dia; dia da semana derivado), data de nascimento (usada para calcular a idade), sexo, diagnóstico primário pela CID-10 (“T75.0”, “X33”; usado para derivar o local de ocorrência: domicílio, via pública, fazenda etc.) e indicador de óbito hospitalar — apresentaram completude superior a 99%. Raça/cor, etnia e escolaridade foram reportadas em apenas uma fração dos registros; esses valores ausentes foram estimados usando alocação proporcional com arredondamento pelo método do maior resto (Hamilton) para preservar os totais mensais. Variáveis não utilizadas, mas disponíveis (por exemplo, tipo de internação, data de alta, tempo de permanência, diagnósticos secundários, procedimentos e campos de custo) foram documentadas para trabalhos futuros. Uma limitação importante é a ausência do município de ocorrência nos microdados do SIH/SUS, o que impossibilita análises espaciais em nível municipal; no entanto, os registros de óbito do SIM/SUS incluem informações municipais. (Brasil, 2022a).

Coletamos 675 arquivos anuais de microdados (1998–2022; 25 anos $\times$ 27 estados). Os campos extraídos — data de nascimento, data do óbito (ano, mês, dia da semana derivados), idade, sexo, escolaridade, raça/cor, local e município de ocorrência (usados para derivar estado, região e outras unidades territoriais), diagnósticos primários e secundários pela CID-10 —

apresentaram completude $\geq 98\%$. Estado civil, indicador de acidente de trabalho e ocupação registrada não foram analisados, mas foram observados como disponíveis para estudos subsequentes. (Brasil, 2022b).

Dados dos censos de 2000, 2010 e 2022 e projeções intercensitárias oficiais do IBGE para os anos intermediários (1998–1999, 2001–2009, 2011–2021) foram cruzados para verificação de consistência; não foram encontradas discrepâncias superiores a 0,5%. As populações estaduais e regionais foram calculadas como média ao longo dos 25 anos. Para comparações internacionais, foram obtidos pelo menos dois pontos de dados (primeiro e último ano) por país do Banco Mundial, FMI, ONU e agências nacionais; onde disponíveis, estimativas intermediárias foram incluídas na média. (IBGE, 2023a; IBGE, 2023b).

Os valores estaduais e nacionais do IDH para 2000, 2010 e 2022 foram verificados com base nas publicações oficiais do PNUD e do IBGE. Uma média aritmética simples dessas três observações resultou no IDH médio de cada estado; as médias regionais do IDH foram então calculadas a partir das médias dos estados constituintes. (PNUD, 2024).

Os dados de densidade de raios (NG), em descargas por km^2 por ano ($\text{raios} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$), foram derivados de registros de pulsos luminosos capturados pelo Lightning Imaging Sensor (LIS) a bordo do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) da NASA, durante o período de 1998 a 2013. A base de dados primária foi processada no contexto de um estudo para a revisão da norma técnica ABNT NBR 5419:2015, onde os registros foram ajustados por um fator de correção para estimar a densidade máxima anual em cada município brasileiro (Naccarato et al., 2022). Para a presente análise, partiu-se das normais climatológicas mensais (Blakeslee, 2021), ajustando-as para os maiores valores mensais de cada município. Em seguida, calculou-se a média aritmética desses máximos municipais para obter uma série temporal mensal de NG para cada estado e região. Visando explorar a relação temporal entre a sazonalidade das tempestades e seus impactos na saúde, as séries de densidade de raios, hospitalizações e óbitos foram padronizadas, de forma que o maior valor de cada variável ao longo do período fosse normalizado para 1. Este procedimento permitiu a comparação direta do perfil das curvas, associando a dinâmica da densidade de raios aos registros epidemiológicos. (Blakeslee, 2021; Naccarato et al., 2022).

No geral, as verificações de qualidade dos dados confirmaram alta completude para as variáveis centrais, imputação transparente para campos sociodemográficos parcialmente ausentes e limitações documentadas (notadamente a ausência de município no SIH/SUS). Esta

avaliação rigorosa sustenta a validade de nossas análises epidemiológicas temporais, espaciais e sociodemográficas.

4. RESULTADOS

4.1. Índice de Letalidade das Vítimas de Raios no Mundo

A RSL conduzida neste estudo resultou na identificação de 17 publicações contendo dados sobre vítimas fatais e não fatais de raios em 16 países ou regiões subnacionais, além do Brasil. Com base nessas informações, foram calculadas as taxas de morbidade, mortalidade e letalidade associadas a acidentes com raios em diferentes contextos geográficos. Os dados populacionais, o número de vítimas e os respectivos indicadores para cada localidade analisada estão organizados de forma sintética (Tabela 3).

Os resultados evidenciam uma grande variabilidade no Índice de Letalidade entre os países estudados, com valores oscilando entre 6,5% no Reino Unido e 85,0% em Bihar, na Índia. Essa última é uma das províncias mais populosas do mundo, com mais de 130 milhões de habitantes, dos quais cerca de 88,7% vivem em áreas rurais. De forma geral, observa-se que países desenvolvidos (com exceção de Uganda) apresentam taxas de letalidade iguais ou inferiores a 32,1%, enquanto os países em desenvolvimento (com exceção da Grécia) concentram taxas iguais ou superiores a 44,0%.

As taxas de morbidade (Eq. 1) também apresentaram ampla variação entre os países analisados. O maior valor foi identificado em Uganda, com 0,47 vítimas para cada 100 mil habitantes, enquanto o menor foi registrado no Reino Unido, com 0,05 vítimas por 100 mil habitantes. Nesse cenário, o Brasil apresentou uma taxa de morbidade intermediária, estimada em 0,07 vítimas por 100 mil habitantes.

Quanto à taxa de mortalidade (Eq. 2), o maior índice foi novamente observado em Bihar, com 0,22 óbitos por 100 mil habitantes, seguido por outras regiões em desenvolvimento. Por outro lado, o menor índice foi encontrado no Reino Unido, com apenas 0,005 óbitos por 100 mil habitantes. O Brasil apresentou uma taxa de mortalidade intermediária, estimada em 0,05 por 100 mil habitantes, valor próximo à média de países com características demográficas semelhantes.

O Índice de Letalidade (Eq. 3) brasileira foi estimada em 66,9%. Esse valor posiciona o Brasil entre os países com índices mais elevados do mundo, superando a maioria das nações em desenvolvimento incluídas na análise comparativa.

Tabela 3 – Lista de países identificados a partir da Revisão Sistemática de Literatura, ordenados a partir da Letalidade percentual entre as vítimas de raios no mundo. São apresentadas as informações sobre o período de consolidação de vítimas, a população média no período, o número de vítimas, as taxas de morbidade e mortalidade (por 100 mil habitantes) e o Índice de Letalidade percentual entre as vítimas.

País (Período)	População (em milhões média no período)	Hospitalizações	Fatalidades	Total de Acidentes	Taxa de Mortalidade (por 100 mil habs.)	Taxa de Morbidade (por 100 mil habs.)	Letalidade (percentual)
Índia, Bihar (2017-2022)	125,1	286	1.624	1.910	0,22	0,25	85,0%
Brasil (1998-2022)	188,3	1.129	2.279	3.408	0,05	0,07	66,9%
Bangladesh (2010-2019)	157	1.128	2.149	3.277	0,14	0,21	65,6%
Zâmbia (2013-2023)	17,6	54	94	148	0,05	0,08	63,5%
Turquia (1930-2014)	46,2	685	895	1.580	0,02	0,04	56,6%
Grécia (2000-2010)	11	18	20	38	0,02	0,03	52,6%
Sri Lanka (1974-2019)	17,6	498	549	1.047	0,07	0,13	52,4%
China (1997-2009)	1.281	4.670	5.033	9.703	0,03	0,06	51,9%
Mongólia (2003-2015)	2,7	58	57	115	0,16	0,32	49,6%
Malásia (2008-2015)	29,4	124	100	224	0,04	0,10	44,6%
Malawi (2010-2017)	10,3	75	59	134	0,07	0,16	44,0%
Polônia (2001-2006)	38,2	127	60	187	0,03	0,08	32,1%
Estados Unidos (1959-1990)	200,4	8.233	2.983	11.216	0,05	0,17	26,6%
Canadá (1994-2005)	30,6	152	45	197	0,01	0,05	22,8%
Uganda (2007-2011)	31,5	584	150	734	0,10	0,47	20,4%
Áustria, Estíria (2000-2017)	1,2	18	4	22	0,02	0,10	18,2%
Reino Unido (1988-2012)	60,3	675	47	722	0,01	0,05	6,5%

4.2. Análise Temporal

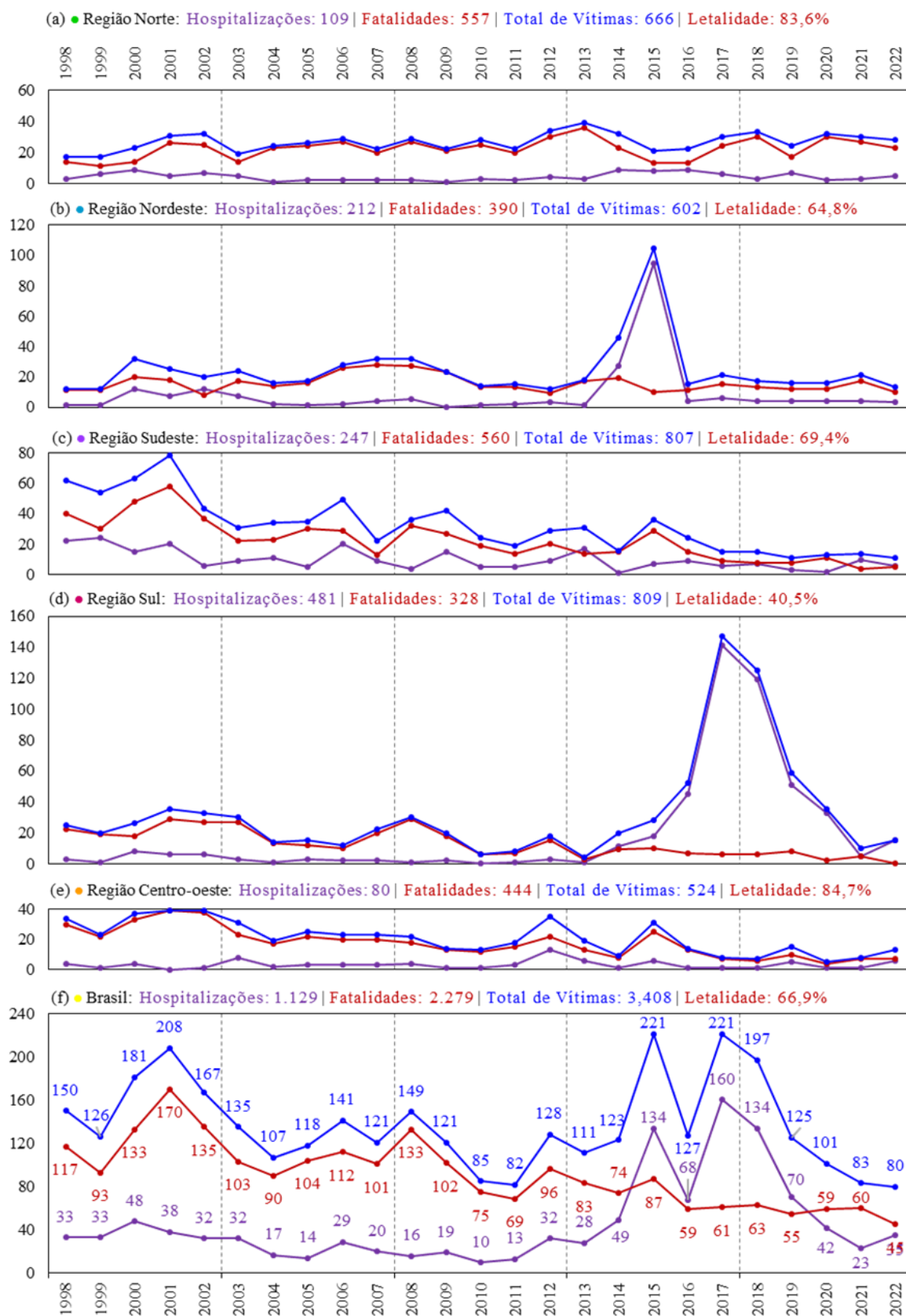
A análise temporal da letalidade por raios realizada neste estudo permitiu identificar tendências significativas em diferentes escalas: anual, mensal, semanal e diária. Essas análises fornecem um panorama abrangente sobre os padrões temporais associados aos acidentes fatais e não fatais causados por raios. Os resultados obtidos possibilitam ainda refletir sobre fatores ambientais e comportamentais que influenciam a ocorrência dos eventos.

A série histórica anual revela ainda uma redução de 38,2% na letalidade entre o primeiro quinquênio (1998–2002) e o último (2018–2022). No entanto, esse comportamento não é homogêneo entre as regiões brasileiras. O Sudeste apresentou redução de 20,8%, o Centro-Oeste de 24,8% e o Sul de notáveis 89,6%. Por outro lado, as regiões Norte e Nordeste apresentaram aumento na letalidade, de 15,2% e 14,2%, respectivamente (Figura 7).

Dois episódios anômalos merecem destaque. O primeiro ocorreu no Nordeste, em 2015, quando foram registradas 95 hospitalizações por raios — sendo 87 delas apenas em Pernambuco. Esse valor é cerca de 3,5 vezes superior ao segundo maior registro da série, de 27 hospitalizações em 2014. Contudo, não foram encontrados registros jornalísticos que expliquem esse pico. O segundo episódio ocorreu no Sul, especialmente no Paraná, que registrou aumentos abruptos nas hospitalizações em 2017 (141 vítimas) e 2018 (119 vítimas), sendo 140 e 117, respectivamente, apenas naquele estado. Reportagens locais sugerem que esses aumentos podem estar associados a eventos esportivos ao ar livre, como o caso de um raio em um estádio de futebol.

Ao longo da série histórica, observa-se uma mudança relevante: nos primeiros anos, o número de óbitos superava o número de hospitalizações, gerando taxas de letalidade superiores a 50%. Com o passar dos anos, verifica-se uma inversão nesse padrão, com aumento das hospitalizações em relação às mortes, o que pode indicar avanços nos sistemas de resposta e atendimento médico de emergência. Contudo, entre 2020 e 2022, esse progresso parece ter sido parcialmente revertido, possivelmente em função das restrições impostas pela pandemia de Covid-19, que dificultaram o acesso aos serviços de saúde, influenciando negativamente os desfechos dos casos.

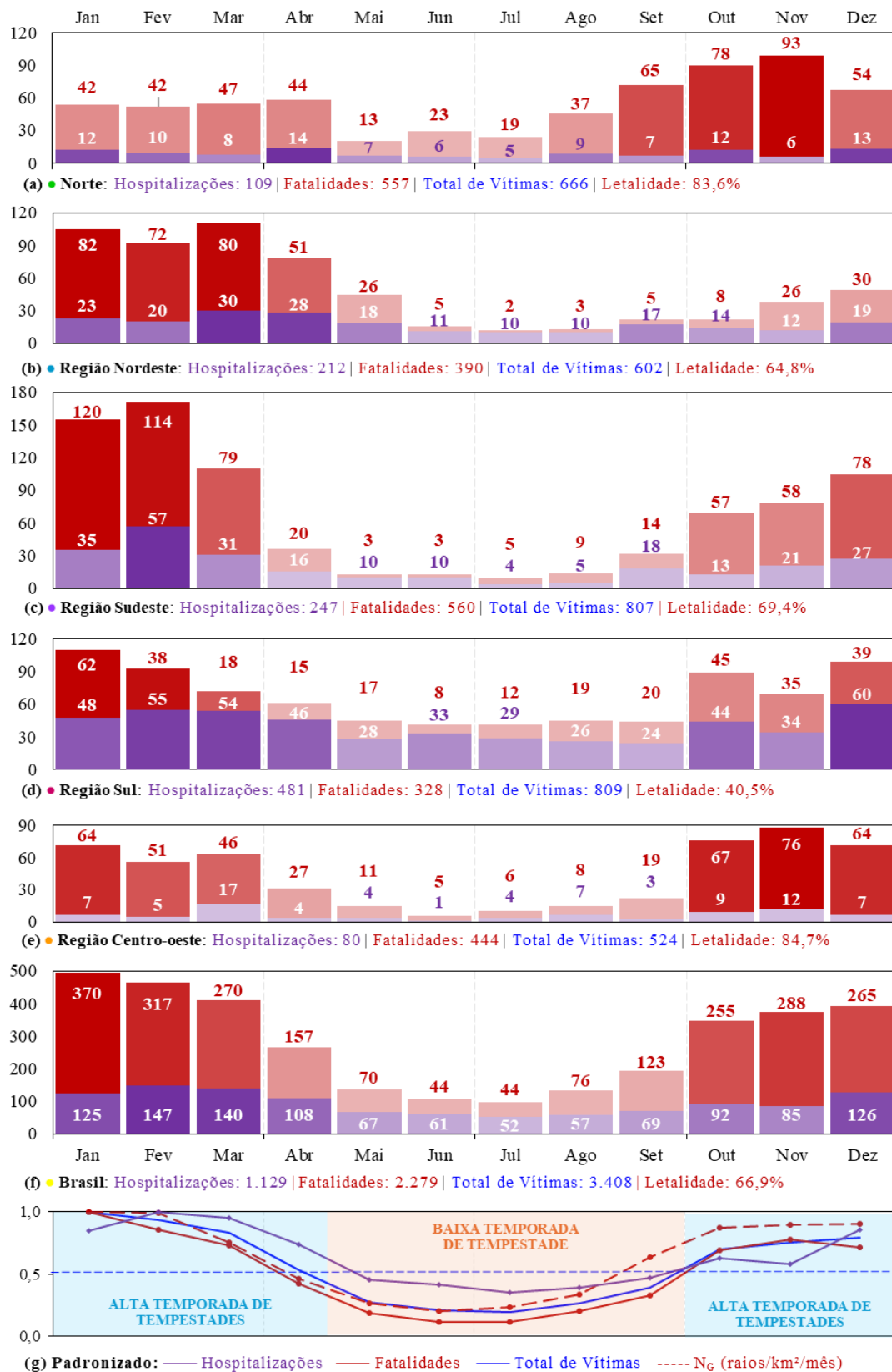
Figura 7 – Série histórica anual das vítimas de raios do Brasil e Regiões, para o período de 25 anos. Os gráficos permitem avaliar as variações quinquenais de hospitalizações e fatalidades, apresentam os totais de acidentes e a letalidade das Regiões e do Brasil. Fonte: O autor.



A distribuição mensal acumulada das fatalidades por raios mostra concentração acentuada no período chuvoso — de outubro a abril — que concentrou 81% dos óbitos registrados no país (Figura 8). Essa sazonalidade é expressiva e se repete em todas as regiões, ainda que com diferentes intensidades. O Sudeste apresenta a maior concentração, com 90% das mortes no período chuvoso, seguido pelo Centro-Oeste (87%) e Nordeste (82%). O Sul e o Norte apresentam distribuições um pouco mais equilibradas, com 73% e 71% das fatalidades concentradas na estação chuvosa, respectivamente, o que pode estar relacionado à variabilidade climática regional.

Como ilustração da força dessa sazonalidade, observa-se que apenas no mês de janeiro foram registradas 370 mortes por raios durante o período analisado. Esse número é superior ao total acumulado de fatalidades ocorridas em toda a estação seca (maio a setembro), que somaram 357 óbitos.

Figura 8 – Série mensal acumulada das vítimas de raios do Brasil e Regiões, para o período de 25 anos (1998-2025). Os gráficos permitem avaliar as variações sazonais de hospitalizações e fatalidades, apresentam os totais de acidentes e a letalidade das Regiões e do Brasil. Fonte: o autor.



A análise semanal das fatalidades por raios no Brasil revelou um padrão que contraria suposições iniciais de maior risco aos finais de semana (Tabela 4.a). O maior percentual de mortes ocorreu às quartas-feiras (16%), seguido de terças e quintas-feiras (ambas com aproximadamente 15%), configurando um pico claro no meio da semana. Já os finais de semana — sábados e domingos — apresentaram os menores percentuais de fatalidades, com cerca de 13% cada.

Esse comportamento pode estar associado à maior exposição de trabalhadores a céu aberto, especialmente em atividades rurais, industriais e da construção civil, mais intensas durante os dias úteis. Adicionalmente, pode estar correlacionado à variabilidade semanal da poluição atmosférica e ao efeito de ilha de calor urbana — ambos mais intensos nos dias úteis devido ao aumento da atividade antrópica.

Quanto à distribuição horária, os dados disponíveis — ainda que limitados a uma parcela dos registros de fatalidades — indicam um claro pico de ocorrência entre 14h e 18h, com destaque para o intervalo entre 15h e 18h, que concentrou 44% das mortes analisadas (Tabela 4.b). Esse padrão está de acordo com o comportamento convectivo típico das regiões tropicais, onde o aquecimento diurno favorece o desenvolvimento de nuvens do tipo cumulonimbus e o aumento da incidência de raios nesse período do dia. Fora desses horários, as ocorrências foram significativamente menores, especialmente durante a noite e início da manhã.

Tabela 4 – Séries semanal e diária acumuladas das vítimas de raios do Brasil, para o período de 25 anos (1998-2025). Fonte: o autor.

Mês	(a) Dia da Semana							Total	% do Total
	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab		
Jan	48	45	54	70	49	54	50	370	16%
Fev	30	42	46	54	61	47	37	317	14%
Mar	44	33	44	28	31	45	45	270	12%
Abr	20	19	27	25	26	25	15	157	7%
Mai	8	11	7	5	12	16	11	70	3%
Jun	6	6	7	5	6	4	10	44	2%
Jul	6	9	9	4	4	8	4	44	2%
Ago	14	12	9	11	13	8	9	76	3%
Set	15	12	14	25	16	21	20	123	5%
Out	25	45	37	43	46	29	30	255	11%
Nov	41	38	48	48	43	31	39	288	13%
Dez	30	41	45	36	39	44	30	265	12%
Total	287	313	347	354	346	332	300	2.279	100%
% do Total	13%	14%	15%	16%	15%	15%	13%		
(b) Faixa Horária	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Total	% do Total
00:01-03:00	4	3	6	5	5	9	4	36	3%
03:01-06:00	3	3	5	2	4	5	7	29	2%
06:01-09:00	5	8	6	6	7	10	9	51	4%
09:01-12:00	8	8	11	13	14	11	9	74	6%
12:01-15:00	42	37	46	60	38	44	27	294	23%
15:01-18:00	76	77	76	96	83	85	69	562	44%
18:01-21:00	23	23	31	30	26	25	27	185	14%
21:00-23:59	10	5	8	5	4	6	9	47	4%
Total	171	164	189	217	181	195	161	1.278	100%

4.3. Análise Espacial

A análise espacial dos acidentes com raios no Brasil permite compreender as desigualdades regionais e estaduais relacionadas à morbidade, mortalidade e letalidade das vítimas. As taxas por estado e região estão representadas de forma cartográfica e numérica, o que possibilita a visualização das disparidades territoriais desses indicadores (Figura 9). As informações são complementadas por indicadores contextuais, como densidade populacional, densidade de raios e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), apresentados na Tabela 4. Adicionalmente, gráficos de dispersão relacionam as taxas de saúde pública com variáveis explicativas como densidade de raios, IDH e densidade demográfica (Figura 10) e os mapas coropléticos apresentam uma sensibilidade visual das relações (Figura 11).

A Figura 10 apresenta a distribuição das fatalidades segundo o local de ocorrência, revelando padrões regionais distintos. Essa abordagem espacial contribui para a identificação de áreas críticas e para o direcionamento de políticas públicas específicas.

As desigualdades entre as regiões são expressivas. De acordo com os dados consolidados, as regiões Centro-Oeste (85,6%) e Norte (83,8%) apresentaram as maiores taxas de letalidade, enquanto a região Sul teve o menor valor (40,6%), seguida pelo Nordeste (64,7%) e Sudeste (69,4%). A taxa nacional de letalidade no período foi de 67,1%, demonstrando que mais de dois terços das vítimas de raios no Brasil foram a óbito (Tabela 5).

No nível estadual, Pernambuco e Paraná destacaram-se por apresentarem as menores taxas de letalidade do país: 16,3% e 22,9%, respectivamente. Esses percentuais são explicados por surtos de hospitalizações em anos específicos, que aumentaram significativamente a proporção de vítimas não fatais. Pernambuco registrou um pico em 2015, enquanto o Paraná apresentou elevações em 2017 e 2018. No extremo oposto, estados como Piauí, Alagoas e Sergipe apresentaram letalidade de 100%, uma vez que todos os registros disponíveis no período foram de óbitos.

Ao se cruzarem os dados de letalidade com indicadores socioeconômicos, observa-se que os estados com menor IDH tendem a apresentar maiores taxas de letalidade. Esse padrão sugere que o acesso limitado a serviços de emergência, infraestrutura hospitalar e informação contribui para o agravamento dos desfechos em acidentes com raios. Por outro lado, variáveis como densidade de raios e densidade demográfica não apresentaram correlação direta com os indicadores de saúde. Os gráficos de dispersão indicam que os padrões observados são

influenciados por múltiplos fatores interdependentes, exigindo uma análise contextualizada por região (Figura 10).

Tabela 5 – Taxas de morbidade, mortalidade e letalidade por raios nos estados e regiões do Brasil, considerando população, área, densidade demográfica, densidade de raios e IDH médio. Os estados estão organizados por região e classificados da maior para a menor letalidade. Fonte: o autor.

Estado/Região (Sigla)	População (hab)	Área (km ²)	Densidade Demográfica (hab.km ⁻²)	IDH	N _c (raio.km ⁻¹ .ano ⁻¹)	Hospitalizações (n.º vítimas)	Óbitos (n.º vítimas)	Total de Acidentes (n.º vítimas)	Taxa de Mortalidade (por 100 mil hab.)	Taxa de Morbidade (por 100 mil hab.)	Letalidade (%)
● Brasil (BR)	187.809.083	8.510.418	22	0,720	16	1.118	2.279	3.397	0,0485	0,0724	67,1%
● Região Norte (NO)	15.370.966	3.850.594	4	0,643	20	108	559	667	0,1506	0,1799	83,8%
● Região Centro-oeste (CO)	13.988.125	1.606.354	9	0,717	22	76	450	526	0,1395	0,1645	85,6%
● Região Sudeste (SE)	79.167.292	924.557	86	0,730	16	246	558	804	0,0255	0,0359	69,4%
● Região Nordeste (NE)	51.811.240	1.552.174	33	0,625	5	211	386	597	0,0322	0,0428	64,7%
● Região Sul (SU)	27.471.459	576.737	48	0,732	24	477	326	803	0,0456	0,1077	40,6%
● Piauí (PI)	3.076.920	251.755	12	0,607	11	0	82	82	0,1066	0,1066	100,0%
● Alagoas (AL)	3.022.450	27.831	109	0,595	2	0	5	5	0,0066	0,0066	100,0%
● Sergipe (SE)	2.019.912	21.938	92	0,628	2	0	4	4	0,0079	0,0079	100,0%
● Amazonas (AM)	3.412.894	1.559.256	2	0,630	27	11	158	169	0,1852	0,1981	93,5%
● Rio Grande do Norte (RN)	3.080.765	52.810	58	0,655	4	2	25	27	0,0325	0,0351	92,6%
● Mato Grosso (MT)	3.065.344	903.208	3	0,687	23	11	136	147	0,1775	0,1918	92,5%
● Roraima (RR)	470.446	223.645	2	0,668	18	3	21	24	0,1786	0,2041	87,5%
● Mato Grosso do Sul (MS)	2.426.971	357.142	7	0,695	32	23	157	180	0,2588	0,2967	87,2%
● Goiás (GO)	6.018.907	340.243	18	0,696	16	21	139	160	0,0924	0,1063	86,9%
● Maranhão (MA)	6.331.483	329.651	19	0,597	13	17	110	127	0,0695	0,0802	86,6%
● Tocantins (TO)	1.350.273	277.424	5	0,652	29	19	110	129	0,3259	0,3821	85,3%
● Espírito Santo (ES)	3.481.018	46.074	76	0,717	8	4	20	24	0,0230	0,0276	83,3%
● Rio Grande do Sul (RS)	10.586.214	281.707	38	0,727	25	29	144	173	0,0544	0,0654	83,2%
● Ceará (CE)	8.221.938	148.894	55	0,652	4	13	59	72	0,0287	0,0350	81,9%
● Rondônia (RO)	1.507.132	237.754	6	0,642	19	15	63	78	0,1672	0,2070	80,8%
● Pará (PA)	7.296.911	1.245.871	6	0,618	22	53	191	244	0,1047	0,1338	78,3%
● Acre (AC)	706.934	164.173	4	0,630	18	4	13	17	0,0736	0,0962	76,5%
● Santa Catarina (SC)	6.402.792	95.731	67	0,747	21	17	54	71	0,0337	0,0444	76,1%
● Paraíba (PB)	3.726.853	56.467	66	0,621	4	2	5	7	0,0054	0,0075	71,4%
● São Paulo (SP)	40.880.971	248.219	165	0,764	21	133	319	452	0,0312	0,0442	70,6%
● Minas Gerais (MG)	19.334.574	586.514	33	0,710	15	82	172	254	0,0356	0,0525	67,7%
● Rio de Janeiro (RJ)	15.470.729	43.750	354	0,729	21	27	47	74	0,0122	0,0191	63,5%
● Bahia (BA)	13.741.814	564.760	24	0,621	5	49	71	120	0,0207	0,0349	59,2%
● Amapá (AP)	626.376	142.471	4	0,658	9	3	3	6	0,0192	0,0383	50,0%
● Distrito Federal (DF)	2.476.903	5.761	430	0,788	16	21	18	39	0,0291	0,0630	46,2%
● Paraná (PR)	10.482.453	199.299	53	0,723	26	431	128	559	0,0488	0,2133	22,9%
● Pernambuco (PE)	8.589.105	98.068	88	0,645	3	128	25	153	0,0116	0,0713	16,3%

Figura 9 - a) Taxa de Mortalidade; b) Taxa de Morbidade; c) Letalidade (%). Os estados estão classificados da maior para a menor taxa. As cores indicam as cinco regiões brasileiras. As taxas de mortalidade e morbidade indicam a incidência populacional, enquanto a letalidade revela a gravidade dos eventos. Fonte: o autor.

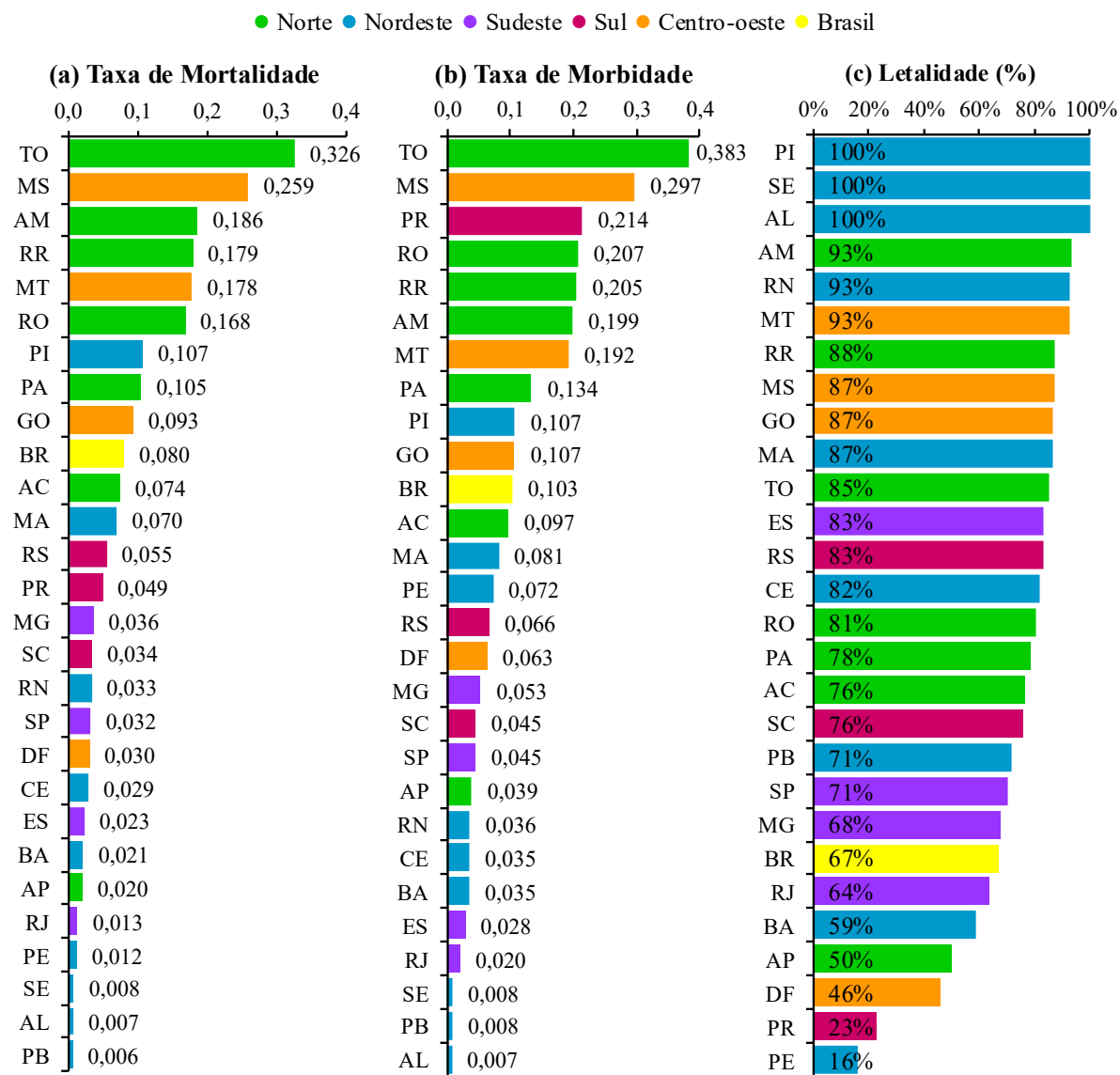


Figura 10 – Gráficos de dispersão entre os indicadores epidemiológicos (mortalidade, morbidade e letalidade) e variáveis contextuais (densidade de raios, IDH e densidade demográfica). As cores representam as cinco regiões. Os padrões sugerem que a influência das variáveis depende do contexto regional.

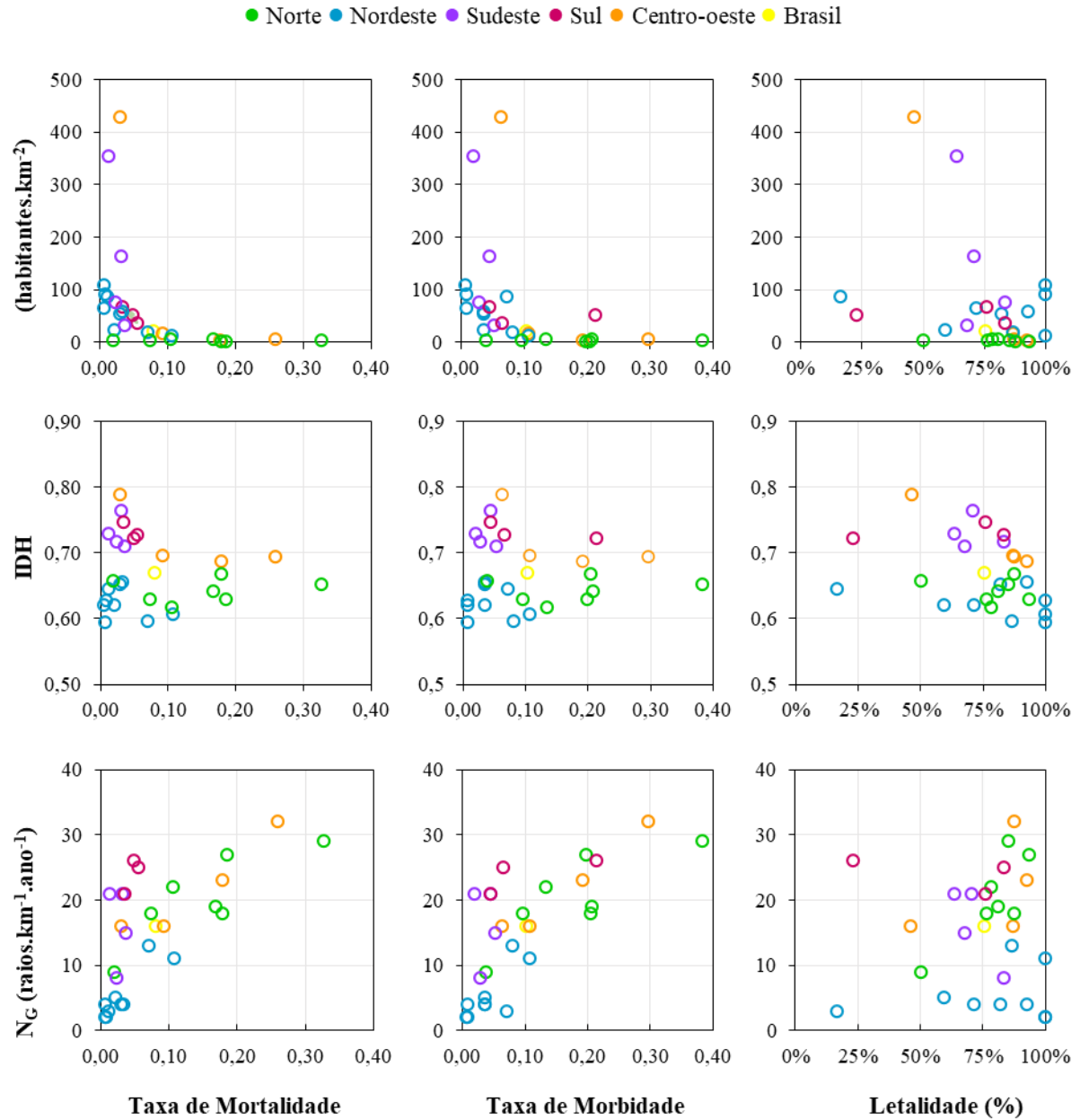
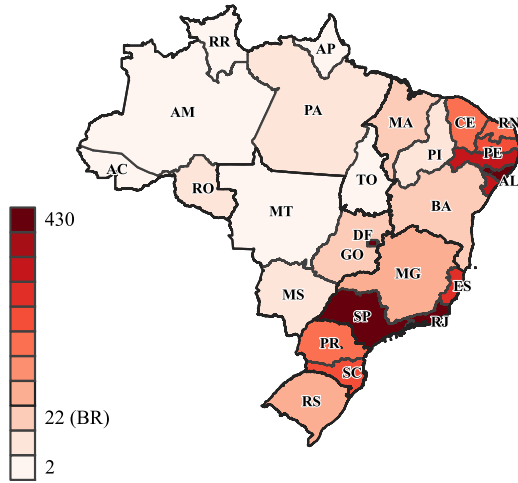
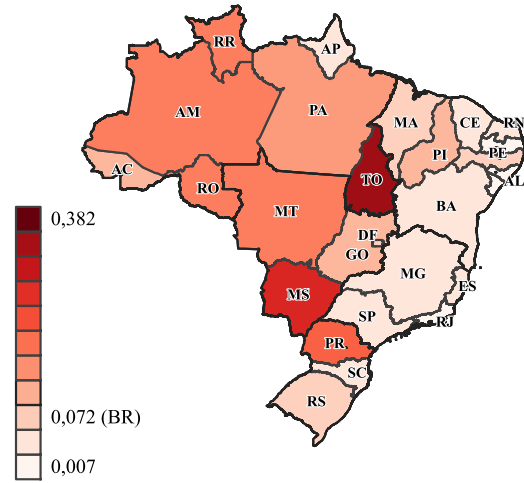


Figura 11 – Mapas coropléticos do Brasil. É possível notar que os Estados com maiores taxas de morbidade, mortalidade e letalidade estão entre os que possuem menor IDH e maior N_G .

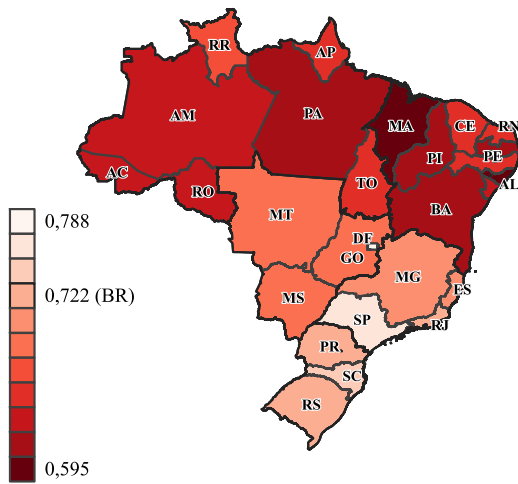
(a) Densidade Populacional (habitantes / km²)



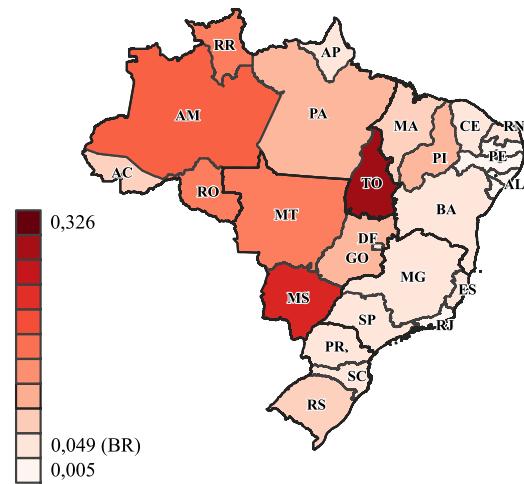
(b) Taxa de Morbidade (por 100.000 habitantes)



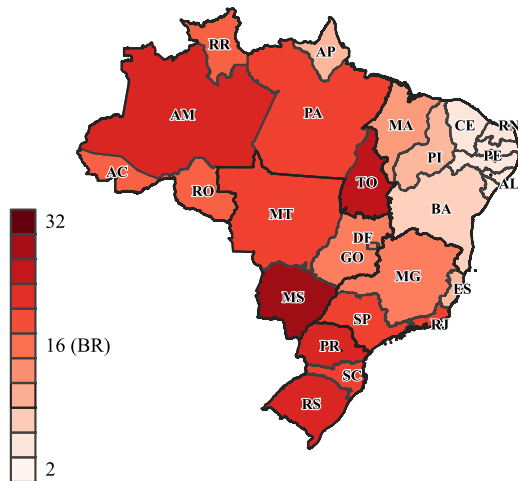
(c) Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)



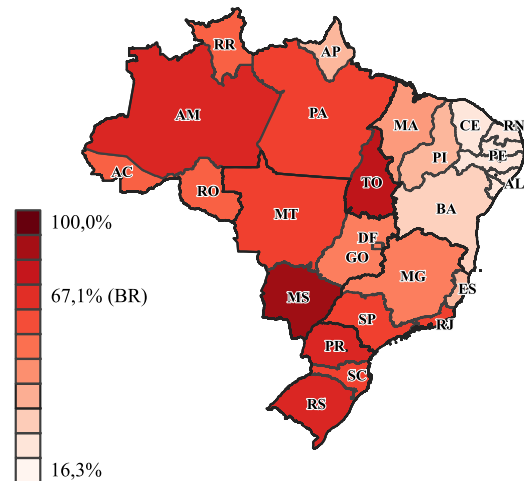
(d) Taxa de Mortalidade (por 100.000 habitantes)



(e) N_G (raios / km² / year)



(f) Índice de Letalidade (%)



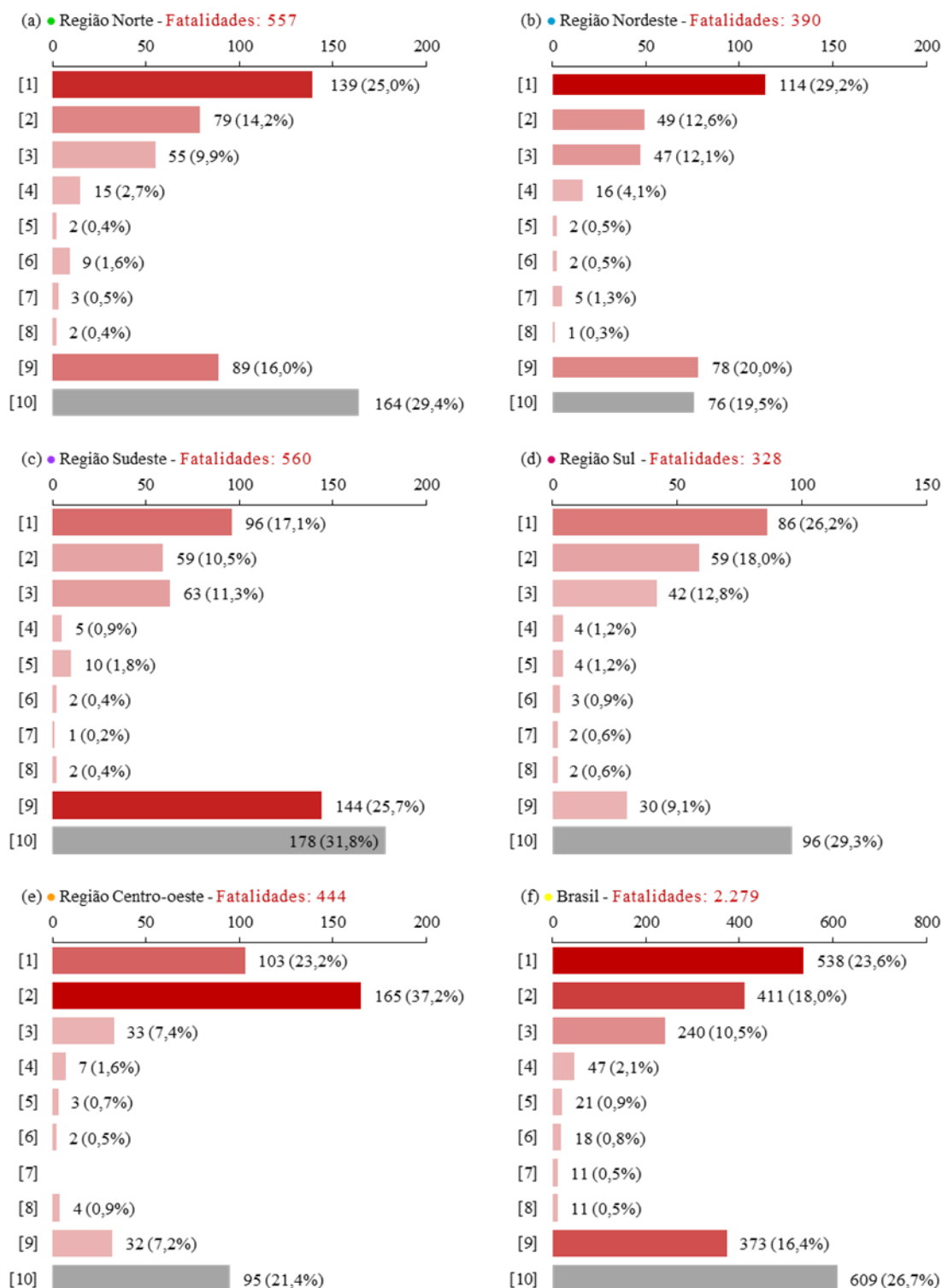
A avaliação do local de ocorrência das mortes por raios revelou três principais ambientes de exposição: *residência*, *fazenda* e *via pública*. Os dados apontam que 23,6% das fatalidades ocorreram em residências, 18,0% em fazendas e 10,5% em ruas e estradas. A proporção de mortes em residências foi particularmente alta no Nordeste (29,2%) e no Norte (25,0%). No Centro-Oeste, a situação se inverteu: 37,2% das mortes ocorreram em fazendas, superando os casos em residências (23,2%) (Figura 12).

Essas informações foram extraídas da codificação de local de ocorrência vinculada ao código CID-10 X33, que inclui subcategorias específicas. Contudo, uma limitação importante é o elevado número de registros classificados como “Local não especificado” (26,7%) e “Outros locais especificados” (16,4%), que juntos somam 43,1% das fatalidades. Apesar dessa limitação, quando essas categorias são desconsideradas, os três principais ambientes de exposição permanecem consistentes entre as regiões analisadas.

Figura 12 – Distribuição das fatalidades por raios segundo o local de ocorrência, por região e no Brasil. Dados acumulados de 1998 a 2022. Consideram-se as categorias do CID-10 para o código X33, com destaque para residência, fazenda e via pública como os principais locais de fatalidade. Fonte: O autor.

Local de Ocorrência:

[1] = Residência. [2] = Fazenda. [3] = Rua e estrada. [4] = Área para a prática de esportes e atletismo.
[5] = Áreas de comércio e de serviços. [6] = Habitação coletiva. [7] = Escolas, outras instituições e áreas da administração pública.
[8] = Áreas industriais e em construção. [9] = Outros locais especificados. [10] = Local não especificado



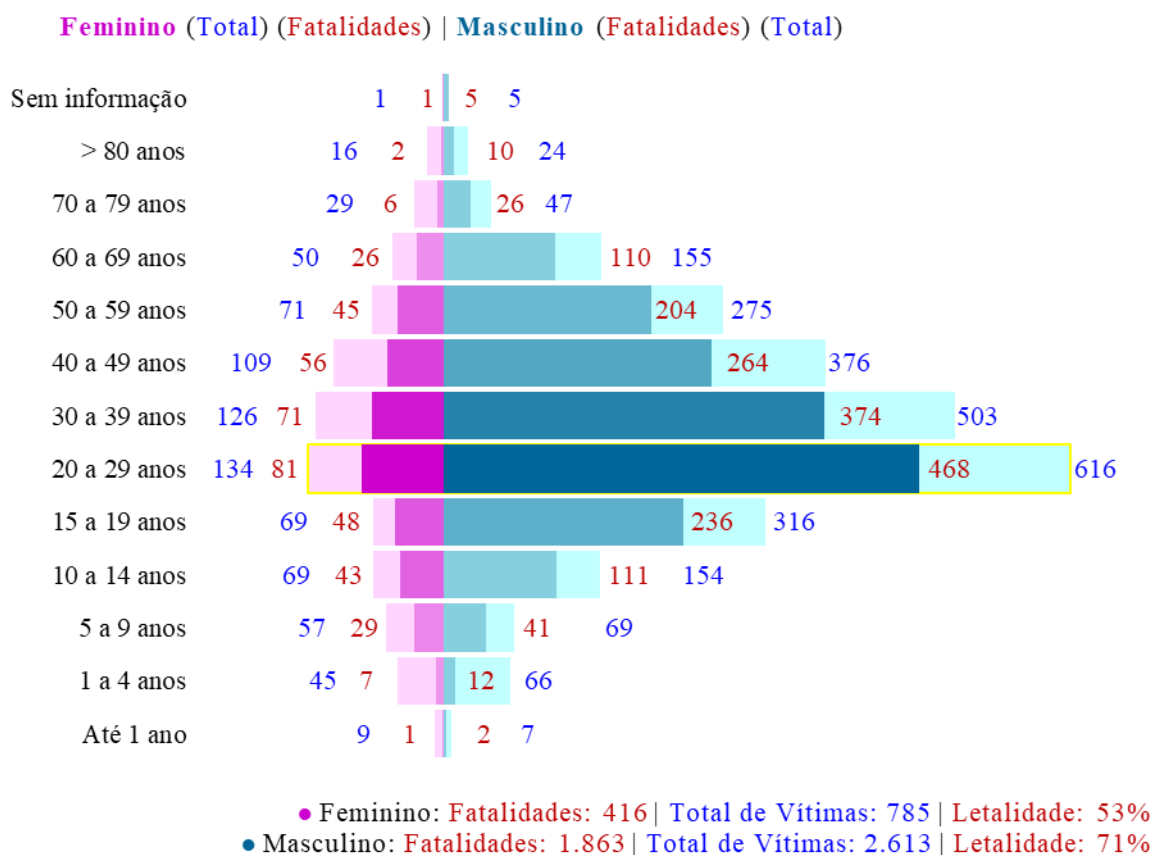
4.4. Análise Demográfica

Esta seção apresenta os principais resultados da análise demográfica das vítimas de raios no Brasil, com base nos dados consolidados do DataSUS para o período de 25 anos (1998 a 2022). A análise contempla três dimensões: distribuição das vítimas por faixa etária e sexo, composição racial por região e grau de escolaridade informado nos registros de óbito. O objetivo é identificar padrões epidemiológicos associados a fatores sociodemográficos, contribuindo para a identificação de grupos mais vulneráveis e disparidades estruturais nas taxas de letalidade.

Os dados apontam um predomínio marcante de vítimas do sexo masculino, que representam 76,9% do total (2.613 de 3.398) e 81,8% das mortes (1.863 de 2.279). As mulheres corresponderam a 23,1% das vítimas (785) e a 18,2% dos óbitos (416). O Índice de Letalidade masculina foi de 71,3%, enquanto a feminina foi de 52,9%, o que indica uma diferença de 18,4 pontos percentuais entre os sexos. Esses dados refletem um padrão de exposição desigual entre homens e mulheres, possivelmente relacionado ao tipo de atividade desempenhada.

A faixa etária mais afetada entre ambos os sexos foi a de 20 a 29 anos. Entre os homens, esse grupo etário correspondeu a aproximadamente 25% das mortes e 24% do total de vítimas. No caso das mulheres, concentrou 20% das mortes e 32% das vítimas registradas. As faixas de 30 a 39 anos e de 40 a 49 anos aparecem em seguida, consolidando um padrão de maior vulnerabilidade entre adultos jovens economicamente ativos. Isso reforça a hipótese de associação entre o risco de fatalidade e a exposição ocupacional a céu aberto (Figura 13).

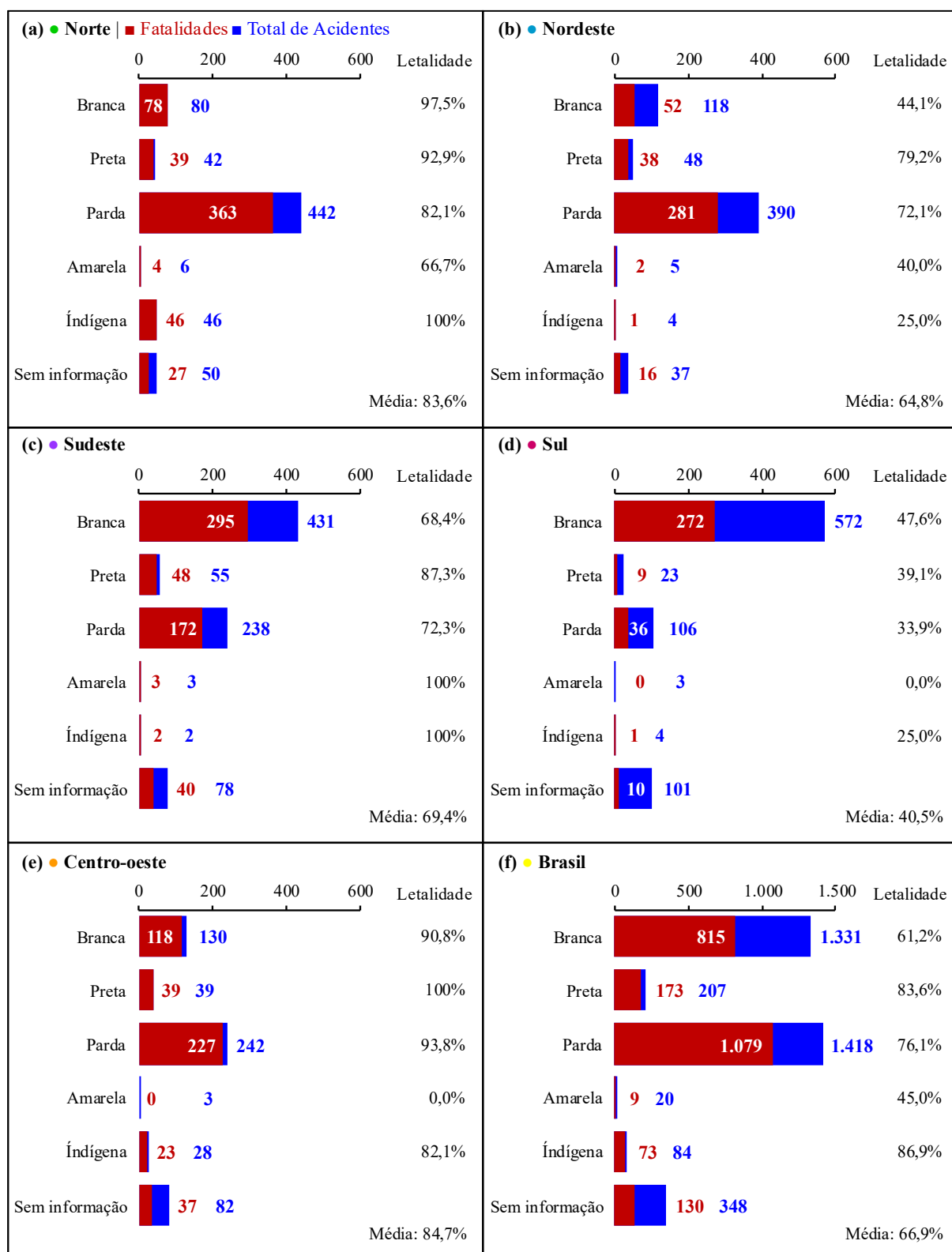
Figura 13 – Distribuição acumulada das vítimas de raios por faixa etária e sexo no Brasil (1998–2022). São apresentadas as proporções de vítimas fatais e não fatais, bem como os percentuais de letalidade por sexo. Fonte: O autor.



A análise da variável raça/cor revelou padrões complexos, com importantes variações regionais. Em termos agregados, as menores taxas de letalidade foram observadas entre pessoas brancas (61,2%) e amarelas (45%). Por outro lado, as maiores taxas foram registradas entre indígenas (86,9%), pretos (83,6%) e pardos (76,1%). Esses resultados sugerem a existência de desigualdades raciais relevantes no desfecho dos acidentes com raios.

Ao desagregar os dados por região, observa-se que as taxas de letalidade para os mesmos grupos raciais variam significativamente. Fatores como acesso à saúde, urbanização, renda e presença de estruturas de proteção parecem exercer influência mais significativa do que a variável racial isoladamente. Nas regiões Norte e Centro-Oeste, por exemplo, a letalidade entre indígenas chega a 100% e 82,1%, respectivamente. Entre os pardos, as taxas ultrapassam 90% nessas mesmas regiões. Já no Sul, esses grupos apresentam letalidade muito inferior, com 25% entre indígenas e 34% entre pardos (Figura 14).

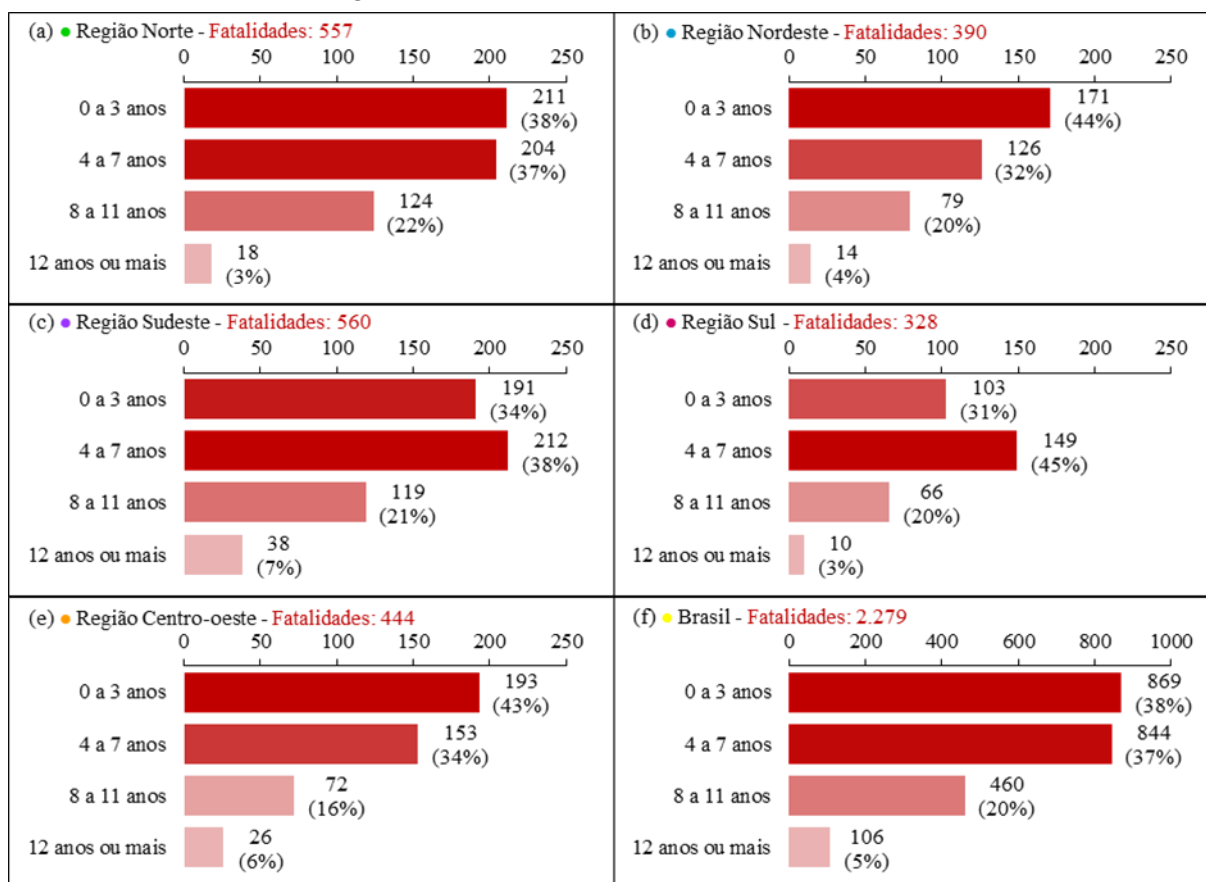
Figura 14 – Distribuição acumulada das vítimas de raios por raça/cor nas regiões brasileiras e no país (1998–2022). São apresentados os totais de hospitalizações, fatalidades e taxas de letalidade para cada grupo racial. Fonte: O autor.



No que se refere ao grau de escolaridade, a maioria das vítimas fatais de raios no Brasil possuía baixo nível de instrução. Cerca de 75% das mortes ocorreram entre pessoas com até 7 anos de escolaridade, sendo 38% com até 3 anos e 37% com 4 a 7 anos de estudo. Essa tendência se repetiu em todas as regiões do país, com destaque para o Nordeste e o Centro-Oeste, onde 76% e 77% das vítimas, respectivamente, pertenciam a essa faixa educacional.

Embora esses dados possam, em parte, refletir a estrutura educacional da população brasileira ao longo do período analisado, a ausência de dados comparativos com a população geral limita conclusões definitivas. Ainda assim, os resultados sugerem que a baixa escolaridade pode estar associada a maior vulnerabilidade frente aos efeitos fatais dos raios. Isso pode estar relacionado à menor compreensão de comportamentos preventivos e à menor capacidade de resposta a situações de risco (Figura 15).

Figura 15 – Distribuição acumulada das vítimas fatais de raios por grau de escolaridade nas regiões brasileiras e no país (1998–2022). São apresentados os totais absolutos e percentuais relativos ao nível de instrução declarado nos registros de óbito. Fonte: O autor.



5. DISCUSSÃO

5.1. Comparação Internacional das Taxas de Letalidade

O Índice de Letalidade das vítimas de raios — definida como a proporção de mortes em relação ao total de atingidos (mortos + sobreviventes) — apresenta variações expressivas entre os países analisados. Essas diferenças refletem desigualdades em infraestrutura, acesso a cuidados médicos, estratégias de prevenção e fatores socioeconômicos amplos. O espectro global vai de índices inferiores a 10% em países desenvolvidos até patamares superiores a 60% em nações de baixa renda.

Nos Estados Unidos, a análise do período de 1959 a 1990 evidenciou uma redução substancial no número absoluto de mortes por raios, além da queda na taxa de mortalidade per capita, que passou de 1,3 para 0,4 por milhão de habitantes. Essa melhoria ocorreu mesmo com a manutenção ou crescimento da atividade elétrica atmosférica no país, sendo atribuída a avanços em tecnologia, educação e infraestrutura de proteção. De forma semelhante, o Canadá apresentou, entre 1994 e 2005, uma taxa média de letalidade de 9,5%, compatível com os padrões observados em outras nações industrializadas. (LÓPEZ; HOLLE, 1996; MILLS et al., 2008).

Em contrapartida, países em desenvolvimento tendem a registrar taxas significativamente mais elevadas. Em Bangladesh, a letalidade por raios foi estimada em 65,6%, com 2.149 mortes e 1.128 feridos registrados, constituindo uma das maiores proporções encontradas na literatura recente. Na Zâmbia, a taxa chegou a 67,7%, enquanto na Mongólia atingiu 49,6%, ambos índices alarmantes e indicativos de vulnerabilidade estrutural. O caso de Uganda é particularmente preocupante, com relatos de eventos fatais em massa envolvendo crianças em escolas, o que evidencia não apenas a alta letalidade, mas também a gravidade dos episódios. (DOLJINSUREN; GOMES, 2016; KULSUM et al., 2021; LUBASI; GOMES, 2023; MARY; GOMES, 2012).

No contexto brasileiro, a taxa média de mortalidade estimada por raios é de 0,8 por milhão de habitantes/ano, posicionando o Brasil como o sétimo país com maior número absoluto de mortes por esse tipo de evento no mundo. Embora a letalidade relativa seja inferior à de países como Bangladesh e Zâmbia, o Brasil apresenta índices elevados quando comparado a países desenvolvidos. Por exemplo, o Reino Unido apresenta uma taxa de apenas 0,03 por milhão de habitantes/ano, a Grécia tem índice de 0,28 e a Áustria registrou letalidade de 16,7%

no período analisado. (ELSOM; WEBB, 2014; PACK; SCHRÖTTNER, 2022; PEPPAS et al., 2012).

Na categoria de países intermediários, como a Turquia, foram observadas taxas entre 0,34 e 0,42 mortes por milhão de habitantes nos anos de 2012 a 2014. Esses valores são superiores aos padrões europeus, mas ainda inferiores às médias de países tropicais com baixa renda per capita. A China, por sua vez, embora registre aproximadamente 210 mortes anuais, apresenta uma taxa relativa moderada, dado o tamanho da sua população. (TILEV-TANRIOVER et al., 2015; ZHANG et al., 2011).

5.2. Vulnerabilidades socioeconômicas e desigualdades regionais

A análise internacional dos dados revela que desigualdades regionais e socioeconômicas exercem papel decisivo na determinação da vulnerabilidade das populações aos efeitos das descargas atmosféricas. Em países com menor nível de desenvolvimento econômico, observa-se a concentração de fatalidades em áreas rurais, geralmente marcadas por infraestrutura precária, ausência de políticas públicas específicas de prevenção e limitada cobertura de sistemas de alerta precoce.

No Brasil, foi identificada uma concentração de taxas mais elevadas de mortalidade em estados das regiões Centro-Oeste e Norte, como Tocantins, que apresentou uma taxa de 4,6 mortes por milhão de habitantes. Tais resultados foram associados a condições de habitação precária, uso inseguro de equipamentos elétricos e falta de proteção adequada durante tempestades. Situação semelhante é relatada na China, onde as províncias de *Guizhou*, *Yunnan*, *Hunan* e *Sichuan*, caracterizadas por alta densidade populacional e baixos indicadores socioeconômicos, concentram a maior parte das fatalidades. (CARDOSO et al., 2014; ZHANG et al., 2011).

A correlação entre pobreza, exclusão territorial e risco de morte por raios torna-se ainda mais evidente nos casos de Uganda e Zâmbia. Em Uganda, a ausência de infraestrutura básica, como sistemas de proteção contra descargas (SPDA) em escolas e residências, resultou em episódios com múltiplas mortes, especialmente entre crianças em idade escolar. Na Zâmbia, a maioria dos acidentes foi registrada em comunidades agrícolas localizadas nas províncias Eastern, Southern e Western, onde predominam baixos índices de desenvolvimento humano e moradias frágeis. (LUBASI; GOMES, 2023; MARY; GOMES, 2012).

Na Índia, o estado de Bihar destaca-se por concentrar distritos com altíssimas taxas de fatalidade, associadas à pobreza extrema, alta densidade populacional e predominância de atividades agrícolas. O mesmo padrão é observado em Bangladesh, cujas regiões norte e noroeste, com baixos níveis de renda e infraestrutura deficiente, lideram os registros de mortes por raios. No Sri Lanka, as áreas agrícolas das províncias Central, de *Sabaragamuwa* e Noroeste concentram os casos mais graves, reflexo da exposição prolongada a céu aberto em atividades externas. (EDIRISINGHE; MADURANGA, 2021; KULSUM et al., 2021; SHANKAR et al., 2024).

Mesmo em países de renda média, como a Turquia, observa-se padrão semelhante. Cerca de 86% dos casos de acidentes com raios ocorreram em áreas rurais, geralmente associadas à agricultura, pecuária e ausência de medidas preventivas estruturadas. A Polônia, embora localizada em contexto europeu, apresenta letalidade elevada nas regiões rurais e semiurbanas, justamente onde faltam sistemas de alerta eficientes e ações educativas voltadas à prevenção. (ŁOBODA, 2008; TILEV-TANRIOVER et al., 2015).

Em contraste, países com infraestrutura mais robusta apresentam impacto regional mais atenuado das desigualdades. No Canadá, apesar das diferenças entre províncias, a presença de sistemas de alerta, redes de proteção e maior acesso a abrigos contribuiu para a redução dos riscos associados aos raios. Na Áustria, a existência de ampla cobertura médica e infraestrutura consolidada foi identificada como fator essencial para mitigar os efeitos das descargas. (MILLS et al., 2008; PACK; SCHRÖTTNER, 2022).

5.3. Influência da Urbanização, Poluição e Ilha de Calor Urbana

A urbanização pode tanto reduzir quanto aumentar o risco de acidentes por raios. Regiões urbanas consolidadas, dotadas de edificações aterradas, abrigos adequados, sistemas de alerta precoce e boa infraestrutura de saúde, tendem a apresentar taxas de letalidade menores. Porém, quando o crescimento urbano ocorre de forma acelerada e desordenada, sem planejamento, há elevação na incidência de descargas atmosféricas e surgimento de novos riscos.

No Brasil, o fenômeno é especialmente evidente em grandes centros. A expansão urbana em Manaus, por exemplo, elevou significativamente a densidade de raios em razão da formação de ilhas de calor e do aumento da poluição atmosférica. De modo similar, na região metropolitana de São Paulo observou-se, entre 1999 e 2009, correlação direta entre o

aquecimento urbano, o incremento de NO₂ e o aumento das descargas elétricas. Além disso, há registro de um ciclo semanal na frequência de raios, com pico entre segunda e sexta-feira, sugerindo influência clara da poluição antrópica na geração de tempestades severas (PINTO JR. et al., 2013; BOURSCHEIDT et al., 2016; FARIAS et al., 2014).

Em ambientes urbanos e industriais de Kuala Lumpur, na Malásia, verificou-se correlação semelhante entre densificação urbana e aumento de fatalidades por raios, atribuída à combinação de calor urbano, poluição e exposição ocupacional externa. Essa relação é ainda reforçada pela influência de mudanças climáticas e do adensamento sobre a intensidade e frequência das tempestades (HAJIKHANI et al., 2016; PINTO JR. et al., 2015).

Por outro lado, em países com urbanização consolidada e infraestrutura resiliente, como Reino Unido e Áustria, a maioria dos óbitos por raios ocorre em zonas recreativas abertas — e não nos centros urbanos propriamente ditos — indicando que uma urbanização bem equipada continua protegendo a população. Nessas nações, as fatalidades concentram-se em áreas rurais ou durante atividades ao ar livre, longe de edificações densas (ELSOM; WEBB, 2014; PACK; SCHRÖTTNER, 2022).

Em nações de renda média, como Turquia, Grécia e Polônia, o padrão segue o de zonas rurais: apesar do crescimento urbano em metrópoles como Istambul, 86% dos eventos fatais ocorrem no campo, onde faltam equipamentos de proteção, sistemas de alerta e educação preventiva. Esse padrão reflete que a urbanização só é fator de redução de risco quando acompanhada de infraestrutura e políticas públicas adequadas (TILEV-TANRIOVER et al., 2015; ŁOBODA, 2008; PEPPAS et al., 2012).

5.4. Dinâmica temporal e padrões de atividade humana

A análise temporal dos acidentes por raios demonstra forte correlação entre períodos de alta atividade convectiva e padrões de exposição da população. Em diferentes países, a maioria das fatalidades ocorre durante estações quentes e chuvosas, quando as pessoas se concentram em atividades ao ar livre, sejam recreativas ou produtivas. Essa vulnerabilidade resulta não apenas das condições meteorológicas, mas também da rotina social e dos ciclos econômicos locais (CARDOSO et al., 2014; ZHANG et al., 2011; EDIRISINGHE; MADURANGA, 2021).

No Brasil, o pico de mortes por raios acontece entre dezembro e fevereiro, coincidindo com o verão e o aumento da exposição ao ar livre. Em Bangladesh e em países africanos como Uganda e Zâmbia, a maioria dos óbitos concentra-se entre abril e junho, fase crítica da pré-

monção, e no final da estação chuvosa, quando trabalhadores rurais permanecem em campo (KULSUM et al., 2021; LUBASI; GOMES, 2023; MARY; GOMES, 2012).

A ocupação profissional emerge como fator de risco consistente. Em Bihar (Índia), mais de 75% das vítimas estavam envolvidas em atividades agrícolas ou na construção civil, frequentemente sem proteção. Na Turquia, pastores, agricultores e operários rurais compõem a maioria das mortes. (SHANKAR et al., 2024; TILEV-TANRIOVER et al., 2015).

Em nações desenvolvidas, o lazer ao ar livre também contribui para o risco. No Canadá, fatalidades foram registradas em atividades esportivas e náuticas, como golfe e vela. No Reino Unido, mortes por raios ocorrem principalmente em feriados de verão e finais de semana, quando há maior deslocamento a áreas recreativas. Já na Áustria, as vítimas estavam em caminhadas, agricultura recreativa ou montanhismo no momento da descarga (MILLS et al., 2008; ELSOM; WEBB, 2014; PACK; SCHRÖTTNER, 2022).

A distribuição horária dos acidentes reforça a influência da rotina humana, com maior concentração entre 12h e 17h, período de desenvolvimento convectivo e intensa atividade externa. Estudos no Sri Lanka apontam que 85% das mortes ocorreram nesse intervalo, padrão também identificado na Grécia, alinhado aos horários de trabalho e lazer ao ar livre (EDIRISINGHE; MADURANGA, 2021; PEPPAS et al., 2012).

5.5. Perfil sociodemográfico das vítimas e implicações em políticas públicas

A literatura internacional sobre mortalidade por raios revela um perfil sociodemográfico recorrente, marcado por desigualdades de gênero, faixa etária, ocupação e contexto socioeconômico. Esses padrões reforçam a importância de abordagens interseccionais na formulação de políticas públicas de prevenção e resposta, já que a exposição ao risco não é homogênea, mas modulada por fatores estruturais e culturais em cada país.

O predomínio masculino entre as vítimas é consistente em diferentes contextos, refletindo maior presença de homens em atividades externas e laborais. No Brasil, mais de 80% dos óbitos por raios ocorreram entre homens de 20 a 49 anos, padrão semelhante ao observado na China e na Índia, onde 75% e 86,5% das vítimas eram homens economicamente ativos, respectivamente (CARDOSO et al., 2014; ZHANG et al., 2011; SHANKAR et al., 2024).

A concentração de casos em adultos jovens também aparece em outras regiões. Em Bangladesh, 91% das vítimas tinham entre 10 e 49 anos, enquanto em Zâmbia a maioria tinha

entre 15 e 44 anos, incluindo agricultores, estudantes e trabalhadores informais. Em Uganda, foram relatados múltiplos óbitos de crianças em idade escolar, evidenciando fragilidades na proteção em escolas públicas (KULSUM et al., 2021; LUBASI; GOMES, 2023; MARY; GOMES, 2012).

O perfil ocupacional das vítimas reforça essas vulnerabilidades. Na Turquia, 82% dos óbitos ocorreram entre pastores e trabalhadores rurais, e no Sri Lanka camponeses e operários da construção civil mostraram alta letalidade, em função da exposição constante sem equipamentos de proteção adequados (EDIRISINGHE; MADURANGA, 2021; TILEV-TANRIOVER et al., 2015).

Mesmo em países desenvolvidos, grupos vulneráveis continuam em destaque. No Reino Unido, a maioria das vítimas eram homens adultos praticando atividades recreativas ao ar livre, e na Áustria as fatalidades também envolveram predominantemente homens de meia-idade durante caminhadas ou esportes, demonstrando que o comportamento individual frente às tempestades mantém risco elevado (ELSOM; WEBB, 2014; PACK; SCHRÖTTNER, 2022).

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação alcançou seu objetivo central ao integrar métodos epidemiológicos, ambientais e estatísticos para aprofundar o entendimento dos fatores que influenciam a letalidade e a incidência de raios, oferecendo subsídios para a formulação de estratégias de prevenção e mitigação. A abordagem interdisciplinar permitiu reunir evidências de revisão sistemática da literatura e análise dos dados brasileiros (1998–2022), evidenciando padrões temporais, espaciais e sociodemográficos consistentes. Dessa forma, foram identificados determinantes críticos — estruturais, comportamentais e ambientais — que moldam o risco de fatalidade por raios.

A comparação internacional das taxas de letalidade mostrou que os menores índices não são explicados apenas pela densidade de descargas ou pela exposição populacional absoluta, mas dependem sobretudo da capacidade de resposta do sistema de proteção civil, da segurança das estruturas urbanas e da eficácia de ações educativas e de alerta precoce. Contextos com acesso universal a abrigos seguros, campanhas de conscientização e monitoramento meteorológico eficiente apresentaram consistentemente menor letalidade por raios.

As vulnerabilidades socioeconômicas e regionais revelaram que o risco de morte por descarga atmosférica está fortemente condicionado por fatores como acesso à moradia segura, à informação de risco, à capacidade institucional e à cobertura de políticas públicas. Regiões urbanizadas, com infraestrutura adequada, tendem a registrar menor letalidade, enquanto áreas rurais desassistidas mantêm alta exposição e risco, mesmo em países de renda média.

A urbanização, por sua vez, mostrou um efeito dual: quando planejada e equipada com infraestrutura e políticas ambientais adequadas, reduz a vulnerabilidade. Contudo, crescimentos urbanos desordenados, com déficit em infraestrutura e elevados níveis de poluição, intensificam as ilhas de calor e elevam localmente a frequência e intensidade das tempestades, amplificando a exposição das periferias vulneráveis.

A dinâmica temporal e os padrões de atividade humana confirmaram que a combinação de sazonalidade climática com comportamentos ocupacionais e recreativos em horários críticos eleva substancialmente o risco de fatalidades. Estratégias de mitigação devem incluir campanhas educativas alinhadas ao calendário agrícola, alertas meteorológicos em horários de maior convectividade e restrições de atividades ao ar livre em dias de alto risco.

O perfil sociodemográfico das vítimas evidenciou que homens jovens, trabalhadores rurais e pessoas em contextos escolares desprotegidos constituem os grupos mais afetados,

resultado de um entrelaçamento de vulnerabilidades sociais, econômicas e comportamentais. Políticas públicas segmentadas — como sistemas de proteção em escolas e áreas agrícolas, campanhas específicas para trabalhadores externos e ações direcionadas a regiões de maior risco — são essenciais.

As conclusões dialogam diretamente com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) ao subsidiar ações para reduzir mortalidade evitável; o ODS 10 (Redução das Desigualdades) ao evidenciar o impacto de fatores socioeconômicos na vulnerabilidade; e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) ao tratar dos efeitos da urbanização e mudanças climáticas sobre a atividade elétrica atmosférica.

Por fim, recomendam-se as seguintes ações para o Brasil:

- Ampliar a cobertura de sistemas de alerta precoce, com foco em áreas rurais e periferias urbanas;
- Manter campanhas educativas permanentes sobre riscos e comportamentos seguros;
- Instalar sistemas de proteção contra descargas em escolas, unidades de saúde e moradias vulneráveis;
- Incorporar estratégias de mitigação nos planos de desenvolvimento urbano;

Aprimorar registros e estatísticas de acidentes para monitoramento e resposta eficaz.

Como desdobramentos futuros, sugerem-se:

- 1) estudo bibliométrico aprofundado sobre a literatura internacional de vítimas de raios;
- 2) ampliação dos comparativos a outros países tropicais e subtropicais;
- 3) desenvolvimento de modelo estatístico multivariado e longitudinal para quantificar o papel relativo de variáveis demográficas, ambientais, socioeconômicas e institucionais.

Em síntese, a prevenção de mortes por raios exige uma abordagem intersetorial que articule saúde, meio ambiente, infraestrutura e educação, constituindo-se num compromisso ético com a redução de desigualdades evitáveis e a promoção do bem-estar em contextos de risco crescente.

7. REFERÊNCIAS

- ADRIAANSE, L. S.; RENSLEIGH, C. Web of science, scopus and google scholar a content comprehensiveness comparison. **Electronic Library**, v. 31, n. 6, p. 727–744, 2013.
- ALYAN, O. et al. Myocardial Injury Due to Lightning Strike. **Angiology**, v. 57, n. 2, p. 219–223, mar. 2006.
- ANDERSON, R. B. Does a fifth mechanism exist to explain lightning injuries? Investigating a possible new pathway of current to determine the cause of injuries related to close lightning flashes. **IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine**, v. 20, n. 1, p. 105–113, 2001.
- ANDREWS, C. J. Telephone-related lightning injury. **Medical Journal of Australia**, v. 157, n. 11–12, p. 823–826, 1 dez. 1992.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. Atmosphere, Weather and Climate. **Atmosphere, Weather and Climate**, 20 out. 2009.
- BEAGLEHOLE, R.; BONITA, R.; KJELLSTRÖM, T. **Epidemiologia Básica**. Tradução: Juraci A Cesar. 2ª Edição ed. [s.l.] World Health Organization, 2010.
- BECERRA, M.; COORAY, V. On the interaction of lightning upward connecting positive leaders with humans. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 4, p. 1001–1008, nov. 2009.
- BIER, M. et al. Biophysical injury mechanisms associated with lightning injury. **NeuroRehabilitation**, v. 20, n. 1, p. 53–62, 2005.
- BLAKESLEE, R. J. **Lightning Imaging Sensor (LIS) on TRMM Science Data V4**. HuntsvilleNASA Global Hydrometeorology Resource Center DAAC, , 2021. Disponível em: <<https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/ghrc-daac-lislip-4>>
- BLUMENTHAL, R.; WEST, N. J. Investigating the risk of lightning's pressure blast wave. **South African Journal of Science**, v. 111, n. 3/4, p. 1–5, 27 mar. 2015.
- BOURSCHEIDT, V.; PINTO JÚNIOR, O.; NACCARATO, K. P. The effects of Sao Paulo urban heat island on lightning activity: Decadal analysis (1999–2009). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 9, p. 4429–4442, 16 maio 2016.
- BRÄMER, G. R. International statistical classification of diseases and related health problems. Tenth revision. **World health statistics quarterly. Rapport trimestriel de statistiques sanitaires mondiales**, v. 41, n. 1, p. 32–6, 1988.
- BRASIL. **Autorização de Internação Hospitalar (AIH Reduzida)**. (Ministério da Saúde, Ed.)BrasíliaMinistério da Saúde, , 2022a. Disponível em: <<https://datasus.saude.gov.br/acesso-a-informacao/morbidade-hospitalar-do-sus-sih-sus/>>. Acesso em: 30 abr. 2025
- BRASIL. **Declaração de Óbito (DO)**. (Ministério da Saúde, Ed.)BrasíliaMinistério da Saúde, , 2022b.

CARDOSO, I. et al. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v. 135–136, p. 374–379, 1 jan. 2014.

COOPER, M. A. A Fifth Mechanism of Lightning Injury. **Academic Emergency Medicine**, v. 9, n. 2, p. 172–174, 1 fev. 2002.

COOPER, M. A. Whether the medical aspects of lightning injury are different in developing countries. **2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012**, 2012.

COOPER, M. A.; HOLLE, R. L. Economic Damages of Lightning. Em: **Reducing Lightning Injuries Worldwide**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 51–62.

COORAY, V. An introduction to lightning. **An Introduction to Lightning**, p. 1–386, 1 jan. 2015.

COORAY, V.; COORAY, C.; ANDREWS, C. J. Lightning caused injuries in humans. **Journal of Electrostatics**, v. 65, n. 5–6, p. 386–394, 1 maio 2007.

CUMMINS, K. L. et al. A case study of lightning attachment to flat ground showing multiple unconnected upward leaders. **Atmospheric Research**, v. 202, p. 169–174, 1 abr. 2018.

DE SOUZA, D. F. et al. An analysis of lightning deaths in Brazil 2010-2020. **ICLP 2022 - 36th International Conference on Lightning Protection**, p. 643–647, 2022.

DE SOUZA, D. F. et al. An Analysis of Accidents of Electrical Origin in Brazil between 2016 and 2021. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 3, p. 3151–3160, 1 maio 2023.

DOLJINSUREN, M.; GOMES, C. Lightning related human casualties in Mongolia. **2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016**, 19 dez. 2016.

EDIRISINGHE, M.; MADURANGA, U. G. D. Distribution of Lightning Accidents in Sri Lanka from 1974 to 2019 Using the DesInventar Database. **ISPRS International Journal of Geo-Information** **2021, Vol. 10, Page 117**, v. 10, n. 3, p. 117, 27 fev. 2021.

EDLICH, R. F. et al. Modern Concepts of Treatment and Prevention of Lightning Injuries. **Journal of Long-Term Effects of Medical Implants**, v. 15, n. 2, p. 185–196, 2005.

ELSOM, D. M.; WEBB, J. D. C. Deaths and injuries from lightning in the UK, 1988–2012. **Weather**, v. 69, n. 8, p. 221–226, 1 ago. 2014.

FALAGAS, M. E. et al. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. **The FASEB Journal**, v. 22, n. 2, p. 338–342, 1 fev. 2008.

FARIAS, W. R. G. et al. The influence of urban effect on lightning activity: Evidence of weekly cycle. **Atmospheric Research**, v. 135–136, p. 370–373, 1 jan. 2014.

GOMES, C. **Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries**. First ed. Singapore: Springer Singapore, 2021. v. 780

HAJIKHANI, M. et al. Lightning fatalities and injuries in Malaysia from 2008 to 2015. **2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016**, 19 dez. 2016.

HERSCHEL, J. II. On the lighting spectrum. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 17, p. 61–62, 31 dez. 1869.

HIGGINS, J. P. T. et al. Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions**, p. 1–694, 1 jan. 2019.

HOFFERT, H. H. Intermittent Lightning-Flashes. **Proceedings of the Physical Society of London**, v. 10, n. 1, p. 176, 1 jun. 1888.

HOOLE, P.; HOOLE, S. Lightning Engineering: Physics, Computer-based Test-bed, Protection of Ground and Airborne Systems. **Lightning Engineering: Physics, Computer-Based Test-Bed, Protection of Ground and Airborne Systems**, p. 1–301, 1 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro IBGE, , 2023a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas de população (2001–2020)**. Rio de Janeiro IBGE, , 2023b.

JITSUIKI, K. et al. Lightning Injury Caused by a Side Flash. **American Journal of Medical Case Reports**, Vol. 8, 2020, Pages 538–540, v. 8, n. 12, p. 538–540, 15 out. 2020.

KALINDEKAFE, L. et al. Lightning fatalities in Malawi : A retrospective study from 2010 to 2017. **34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018**, 23 out. 2018.

KOUMBOURLIS, A. C. Electrical injuries. **Critical Care Medicine**, v. 30, n. 11 SUPPL., 1 nov. 2002.

KULSUM, U.; MAHMUD, H.; RAHMAN, M. M. Analysis of Spatio-temporal Variation of Lightning Casualties in Bangladesh. **Springer Climate**, p. 243–265, 2021.

LICHTENBERG, R. et al. Cardiovascular effects of lightning strikes. **Journal of the American College of Cardiology**, v. 21, n. 2, p. 531–536, 1 fev. 1993.

LIVANOV, D. **The physics of planet earth and its natural wonders**. First Edition ed. [s.l.] Springer Nature, 2023.

ŁOBODA, M. Lightning Deaths and Injuries in Poland in Period of 2001–2006. **29th International Conference on Lightning Protection**, 23 jun. 2008.

LÓPEZ, R. E.; HOLLE, R. L. Fluctuations of Lightning Casualties in the United States: 1959–1990. **Journal of Climate**, v. 9, n. 3, p. 608–615, 1 mar. 1996.

LUBASI, F. C.; GOMES, C. Lightning Accidents in Zambia. **APL 2023 - 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning**, 2023.

MACKINTOSH, D. NOTES ON THREE PERSONS STRUCK BY LIGHTNING. ONE DEATH; TWO RECOVERIES. **The Lancet**, v. 84, n. 2135, p. 118, 30 jul. 1864.

MARCOS-PABLOS, S.; GARCÍA-PENALVO, F. J. Decision support tools for SLR search string construction. **ACM International Conference Proceeding Series**, p. 660–667, 24 out. 2018.

MARTINHO, E. et al. Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2024 - Ano base 2023. **Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (Abracopel)**, 4 abr. 2024.

MARY, A. K.; GOMES, C. Lightning accidents in Uganda. **2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012**, 2012.

MAZUR, V. Principles of Lightning Physics. **Principles of Lightning Physics**, 2016.

MILLS, B. et al. Assessment of lightning-related damage and disruption in Canada. **Natural Hazards**, v. 52, n. 2, p. 481–499, 17 jan. 2008.

MOHER, D. et al. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLOS Medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, 1 jul. 2009.

NACCARATO, K. P.; SANTOS, A. P. P.; LIMA, F. J. L. **Incidence of Lightning Strikes to Power Transmission Lines in the South of Brazil: Current and Future Climate**. 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP). **Anais...**Cape Town: IEEE, 2 out. 2022.

OKAFOR, DR. U. V. Lightning Injuries and Acute Renal Failure: A Review. **Renal Failure**, v. 27, n. 2, p. 129–134, jan. 2005.

O'KEEFE GATEWOOD, M.; ZANE, R. D. Lightning injuries. **Emergency Medicine Clinics of North America**, v. 22, n. 2, p. 369–403, 1 maio 2004.

PACK, S.; SCHRÖTTNER, J. A 17-year retrospective review of lightning victims in Austria with focus on lightning effects. **ICLP 2022 - 36th International Conference on Lightning Protection**, p. 572–577, 2022.

PEPPAS, G. D. et al. Analysis of lightning impacts in Greece. **2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012**, 2012.

PICCOLO, D. M. Qualidade de dados dos sistemas de informação do Datasus: análise crítica da literatura. **Ciência da Informação em Revista**, v. 5, n. 3, p. 13–19, 31 dez. 2018.

PINTO JUNIOR, O. et al. A 24-Hour Lightning Forecast System in Brazil. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 7, n. 4, p. 396–397, 8 nov. 2015.

PINTO JÚNIOR, O.; PINTO, I. R. C. DE A.; PINTO NETO, O. Lightning Enhancement in the Amazon Region Due to Urban Activity. **American Journal of Climate Change**, v. 2, n. 4, p. 270–274, 4 dez. 2013.

PRICE, C.; RIND, D. Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 99, n. D5, p. 10823–10831, 20 maio 1994.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Relatório Especial 2023: 25 anos - Desenvolvimento Humano no Brasil - Anexo Estatístico**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.undp.org/pt/brazil/publications/relatorio-especial-2023-25-anos-desenvolvimento-humano-no-brasil-anexo-estatistico>>. Acesso em: 30 abr. 2025.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning: Physics and Effects*. 4 ago. 2003.

RITENOUR, A. E. et al. Lightning injury: A review. **Burns**, v. 34, n. 5, p. 585–594, 1 ago. 2008.

ROMPS, D. M. et al. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. **Science**, v. 346, n. 6211, p. 851–854, 2014.

SHANKAR, A.; KUMAR, A.; SINHA, V. Incident of lightning-related casualties in Bihar, India: An analysis and vulnerability assessment. **Journal of Earth System Science**, v. 133, n. 2, p. 1–18, 1 jun. 2024.

SHIPMAN, J. et al. The Dangerous Life of a Storm Chaser: A Lightning Strike Injury Causing Serious Injury. **Journal of Investigative Medicine High Impact Case Reports**, v. 8, 2020.

TILEV-TANRIOVER et al. Lightning fatalities and injuries in Turkey. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 8, p. 1881–1888, 20 ago. 2015.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. Second Edition ed. [s.l.] Academic Press, 2006.

ZHANG, W. et al. Lightning casualties and damages in China from 1997 to 2009. **Natural Hazards**, v. 57, n. 2, p. 465–476, 10 maio 2011.