



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



DANIELE FERNANDA PAZINI PEDRO

**ESTUDO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO
DEFLAGRADORES DE DESLIZAMENTOS NA CIDADE DE BELO
HORIZONTE – MG**

2024

DANIELE FERNANDA PAZINI PEDRO

**ESTUDO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO DEFLAGRADORES
DE DESLIZAMENTOS NA CIDADE DE BELO HORIZONTE – MG**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Ciência e Tecnologia, Universidade
Estadual Paulista (Unesp), Campus de
São José dos Campos; Centro Nacional
de Monitoramento e Alertas de Desastres
Naturais (Cemaden), como parte dos
requisitos para obtenção do título de
MESTRE pelo Programa de Pós-
Graduação em DESASTRES
NATURAIS. Área: Desastres naturais.
Linha de pesquisa: Deslizamentos.

Orientador: Profa. Dra. Ana Paula Martins
do Amaral Cunha

São José dos Campos

2024

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2024]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Pedro, Daniele Fernanda Pazini

Estudo de eventos extremos de precipitação deflagradores de deslizamentos na cidade de Belo Horizonte-MG / Daniele Fernanda Pazini Pedro. - São José dos Campos : [s.n.], 2024.

85 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

Orientadora: Ana Paula Martins Do Amaral Cunha.

1. Área de risco. 2. Deslizamentos. 3. Precipitação. I. Cunha, Ana Paula Martins Do Amaral, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VI. Título.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha (Orientadora)

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de
Desastres Naturais (CEMADEN)

Profa. Dra. Ana Carolina Vasques Freitas

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas
Campus Itabira

Profa. Dra. Luz Adriana Cuartas

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de
Desastres Naturais (CEMADEN)

São José dos Campos, 01 de março de 2024.

DEDICATÓRIA

Á todas as mulheres na ciência, que de alguma forma promovem a igualdade e favorecem a diversidade no País.

Á minha amada Vovó Ná, por sempre me apoiar com seu amor fraterno e incondicional.

Aos meus pais e minha irmã, por nunca medirem esforços para me proporcionar o melhor.

Ao meu querido Maurício Manzarraga por sempre estar presente e me apoiar em tudo, sem o qual não seria possível superar essa etapa em minha vida.

Aos meus exemplares e eternos professores Ana Carolina Vasques Freitas, Rose-Marrie Belardi e Gláucio Marcelino Marques, por sempre me apoiarem independente de qualquer dificuldade e acreditarem a todo momento em meu potencial.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grande e bom Deus, que sempre operou e opera milagres em minha vida, por começar a boa obra em mim e ainda não terminar.

À Defesa Civil de Belo Horizonte, pelo fornecimento de dados para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) por concessão de dados para que este trabalho viesse a ser concluído.

À minha Orientadora Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha, por toda paciência, dedicação, força e apoio emocional para a conclusão deste trabalho.

À amiga, fiel, companheira e amável Dra. Ana Carolina Vasques Freitas, por sempre me ajudar, me incentivar e me ensinar a ser uma pessoa melhor.

Às minhas amigas Marília Braga e Marina Kelly, por toda bondade e tempo de qualidade em minha vida.

“Mas as coisas findas muito mais que lindas, essas ficarão”.

Carlos Drummond de Andrad

RESUMO

PEDRO, D.F.P. **Estudo de eventos extremos de precipitação deflagradores de deslizamentos na cidade de Belo Horizonte-MG.** 2024. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

Estudos de limiares pluviométricos que possam desencadear deslizamentos são essenciais, principalmente no contexto do monitoramento e alerta de desastres. Assim, o presente estudo utilizou séries temporais de precipitação de cinco estações meteorológicas localizadas na cidade de Belo Horizonte (Buritis, Horto, 83587, Cercadinho e Pampulha) para avaliar os limiares de precipitação relacionados aos eventos de deslizamentos. A partir dessas séries temporais de precipitação foram calculados índices climáticos extremos (acumulados em 24h e 120h) e diferentes percentis (P50, P75, P90, P95 e P99) considerando dados dos anos de 1961 até 2022. Para as análises estatísticas, este trabalho avaliou os limiares para os percentis de chuva acumulada em 24h e 120h, no entanto, alguns casos ultrapassar estes percentis, não correspondeu a um aumento no número de ocorrências. Nestes casos, os acumulados de chuva pretéritos (dias ou semanas), especialmente nos meses de dezembro e janeiro, contribuíram para o elevado número de ocorrências. Assim, se um ou dois meses da estação chuvosa da região, registrarem chuvas acima da média, não é necessário que os acumulados de 24h e 120h sejam tão elevados. Então mesmo com chuva fraca (Percentil 50) ou ausência de chuva, novos deslizamentos podem acontecer devido a umidade e resistência do solo, não na mesma magnitude ou quantidade, mas ainda requer muita atenção. Esses resultados sugerem que a compreensão dos padrões de precipitação ao longo do tempo é essencial para uma avaliação abrangente dos riscos de deslizamentos de terra. Mesmo em períodos de chuva fraca ou ausência de precipitação, a umidade do solo e sua resistência podem ser influenciadas pelos acumulados de chuva anteriores, contribuindo para a ocorrência de deslizamentos, embora em uma escala menor ou com menor frequência. Portanto, conclui-se que a prevenção e a gestão de deslizamentos devem considerar não apenas os limiares de precipitação, mas também os padrões de chuva históricos e as condições do local ao longo do tempo. A implementação de medidas preventivas e de monitoramento contínuo é essencial para mitigar os riscos associados aos deslizamentos, garantindo a segurança das comunidades vulneráveis a esses eventos.

Palavras-chave: Área de risco; Deslizamentos; Precipitação

ABSTRACT

PEDRO, D. F. P. Study of Extreme Precipitation Events Triggering Landslides in the Belo Horizonte – Minas Gerais. 2024. Dissertation (Master's degree in Natural Disaster) - São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

Studies of rainfall thresholds that could trigger landslides are essential, especially in the context of disaster monitoring and warning. Therefore, this study used rainfall time series from five meteorological stations located in the city of Belo Horizonte (Buritis, Horto, 83587, Cercadinho and Pampulha) to assess rainfall thresholds related to landslide events. These precipitation time series were used to calculate extreme climate indices (accumulated over 24 hours and 120 hours) and different percentiles (P50, P75, P90, P95 and P99) considering data from 1961 to 2022. For the statistical analyses, this work evaluated the thresholds for the percentiles of accumulated rainfall in 24h and 120h, however, in some cases exceeding these percentiles did not correspond to an increase in the number of occurrences. In these cases, previous rainfall accumulations (days or weeks), especially in December and January, contributed to the high number of occurrences. Thus, if one or two months of the region's rainy season record above-average rainfall, it is not necessary for the 24-hour and 120-hour accumulations to be so high. So even with light rain (50th percentile) or no rain at all, new landslides can occur due to the humidity and resistance of the soil, not in the same magnitude or quantity, but it still requires a lot of attention. These results suggest that understanding rainfall patterns over time is essential for a comprehensive landslide risk assessment. Even in periods of low or no rainfall, soil moisture and resistance can be influenced by previous rainfall accumulations, contributing to the occurrence of landslides, albeit on a smaller scale or less frequently. Therefore, it can be concluded that landslide prevention and management must consider not only precipitation thresholds, but also historical rainfall patterns and site conditions over time. The implementation of preventive measures and continuous monitoring is essential to mitigate the risks associated with landslides, guaranteeing the safety of communities vulnerable to these events.

Keywords: Risk Area; Landslides; Precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Registros de deslizamentos com a precipitação acumulada (em mm), para um período de 84 horas, e com a intensidade da precipitação (mm/h)	19
Figura 2- Circunstâncias dos óbitos em Minas Gerais entre os períodos chuvosos 2013/2014 a 2019/2020.....	22
Figura 3- Mapa do município de Belo Horizonte em Minas Gerais	28
Figura 4- Mapa Altimétrico do município de Belo Horizonte	29
Figura 5- Mapa de localização das Estações Pluviométricas	30
Figura 6- Algoritmo reclass para fatiamento das classes da Embrapa (1979)	35
Figura 7- Remoções temporárias por ano em Belo Horizonte	39
Figura 8- Vistorias realizadas nas moradias em Belo Horizonte	40
Figura 9- Mapa de uso e ocupação do solo de Belo Horizonte.....	43
Figura 10- Mapa de Declividade do Município de Belo Horizonte	44
Figura 11- Mapa de vulnerabilidade quanto aos riscos de desastres naturais no município de Belo Horizonte	45
Figura 12- Valores de RX1 e RX5 para a estação pluviométrica Belo Horizonte 83587	47
Figura 13- Valores de RX1 e RX5 para a estação pluviométrica Belo Horizonte – Horto	49
Figura 14- Acumulado médio mensal de precipitação entre os anos de 1961 a 2019 para da Estação a) Horto e b) entre os anos de 1961 a 2022 da Estação 83587	50
Figura 15- Acumulado de ocorrências de deslizamentos mensal entre os anos de 2009 a 2022	51
Figura 16- a) Anomalia pluviométrica dos anos de 1961 a 2022 da Estação 83587. b) Anomalia pluviométrica dos anos de 1961 a 2019 da Estação Horto.....	52

Figura 17- Ocorrências de deslizamentos entre 2009 e 2022 no município de Belo Horizonte	53
Figura 18- Mapa de Kernel das ocorrências de deslizamentos entre os 2009 e 2022 em Belo Horizonte	54
Figura 19- a) Ocorrências de deslizamentos por data e precipitação acumulada para 120h da Estação 83587. b) Ocorrências de deslizamentos por data e precipitação acumulada para 120h da Estação Horto	55
Figura 20- Percentis de precipitação de acumulados de 24h e 120h da Estação Horto considerando os anos 1961 a 2019	56
Figura 21- Percentis precipitação para acumulados de 24h e 120h da Estação 83587	60
Figura 22- Percentis de 24h e 120h para a Estação Buritis	64
Figura 23- Percentis de 24h e 120h para a Estação Pampulha	67
Figura 24- Percentis de 24h e 120h para a Estação Cercadinho	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características dos principais grupos do processo de deslizamentos	17
Tabela 2- - Valores limites de precipitação relacionados a eventos de deslizamentos em diferentes cidades brasileiras determinados empiricamente por pesquisadores da área	24
Tabela 3- Informações das Estações Pluviométricas utilizadas	31
Tabela 4- Classes de declividade	34
Tabela 5- Número de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e correspondente classe de chuva para Estação Horto	57
Tabela 6- Total de ocorrências de deslizamentos acumulados em 5 dias, acumulados de chuva em 120h e classe de chuva para Estação Horto.....	58
Tabela 7- Total de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e classe de chuva para a estação 83587	61
Tabela 8- Total de ocorrências de deslizamentos em cinco dias, acumulados de chuva e classe de chuva para 120h da Estação 83587	63
Tabela 9- Número de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e correspondente à classe de chuva para Estação Buritis.....	65
Tabela 10- Total de ocorrências de deslizamentos em cinco dias, acumulados de chuva e classe de chuva para 120h para a Estação Buritis.....	66
Tabela 11- Número de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e correspondente à classe de chuva para Estação Pampulha	68
Tabela 12- Total de ocorrências de deslizamentos em cinco dias, acumulados de chuva e classe de chuva para 120h da Estação Pampulha	70

Tabela 13- Datas e número de ocorrências de deslizamentos dos limiares de precipitação de classe Intensa para 24h da Estação Cercadinho 71

Tabela 14- Datas e número de ocorrências de deslizamentos dos limiares de precipitação de classe Intensa e Muito Intensa para 120h da Estação Cercadinho 72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Deslizamentos	17
2.2 Contextualização dos eventos extremos de precipitação na ocorrência de deslizamentos.....	20
2.3 Contextualização da obtenção de limiares críticos de precipitação como ferramenta de prevenção aos deslizamentos.....	23
3 PROPOSTA DE PESQUISA.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 Área de Estudo	27
4.2 Avaliação do padrão espacial dos eventos extremos de chuvas no município de Belo Horizonte	30
4.3 Índices Climáticos RX1 e RX5.....	31
4.4 Áreas de risco, uso e ocupação do solo inadequado, relevo e vulnerabilidade.....	32
4.4.1 Área de Risco.....	32
4.4.2 Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Município.....	33
4.4.3 Relevo e Vulnerabilidade	33
4.5 AVALIAÇÃO DO PADRÃO TEMPORAL DAS OCORRÊNCIAS DOS EVENTOS DE DESLIZAMENTOS NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE	35
4.5.1 Mapa de Calor (Kernel)	36
4.6 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE OS ACUMULADOS DE CHUVA DIÁRIA E A OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS	37
5 RESULTADOS	38
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: ÁREAS DE RISCO, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, RELEVO, VULNERABILIDADE	38
5.1.1 Áreas de Risco	38
5.1.2 Uso e Ocupação do Solo.....	41
5.1.3 Relevo.....	44
5.1.4 Vulnerabilidade.....	45
5.2 AVALIAÇÃO DO PADRÃO TEMPORAL DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVAS NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE.....	46
5.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CHUVA E	

OCORRÊNCIAS DE OS DESLIZAMENTOS.....	56
6 DISCUSSÕES	73
7 CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais têm apresentado recorrência e impactos cada vez maiores nos dias atuais, sendo responsáveis por expressivos prejuízos de cunho ambiental, econômico e social. De maneira geral, desastres são uma perturbação grave do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade, em qualquer escala, devido a eventos perigosos que interagem com condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade, levando a um ou mais dos seguintes: perdas e impactos humanos, materiais, econômicos e ambientais (UNDRR, 2015).

Os eventos extremos de precipitação podem causar catástrofes em grandes proporções, seja no âmbito social, econômico e ambiental, especialmente em regiões com extensas áreas vulneráveis a desastres.

De acordo com a Defesa Civil de Minas Gerais (2021), os deslizamentos, também denominados como “movimentos de massa” são fenômenos provocados pelo escorregamento de materiais sólidos, como solos, rochas, vegetação e/ou material de construção ao longo de terrenos inclinados, denominados de “encostas”. As áreas vulneráveis aos deslizamentos são caracterizadas como críticas devido à presença de encostas ocupadas de forma desordenada, corte incorreto do aterro e com construções mal planejadas e executadas de forma precária, tornando-as com potencial de deslizamento alto durante a ocorrência de eventos chuvosos. De acordo com o Boletim Técnico da Defesa Civil de Minas Gerais (2018), em Belo Horizonte (BH) e principalmente nas regiões metropolitanas, durante o período chuvoso, ocorrem desastres de natureza geológica, meteorológica e hidrológica, tais como as inundações, alagamentos e enxurradas, sendo esses eventos um dos fatores desencadeantes dos deslizamentos (PAZINI PEDRO et al., 2020). A ocorrência de deslizamentos nas mais variadas cidades brasileiras está sempre associada a episódios de chuva e de acordo com Filho (2001), a associação entre a deflagração dos deslizamentos e os índices pluviométricos têm levado pesquisadores a tentarem estabelecer correlações empíricas, probabilísticas ou físico–matemáticas entre a pluviosidade e a ocorrência desses processos.

O desenvolvimento de caminhos para uma melhor compreensão dos fatores que geram os deslizamentos podem contribuir para que se faça uma adequada gestão deste desastre, podendo minimizá-lo, tornando as comunidades mais resilientes. Souza (2013) ressalta que uma análise cuidadosa dos registros climáticos em longo prazo é importante para o desenvolvimento do trabalho, na medida em que fornece uma base para o conhecimento de tendências climáticas

e as suas causas potenciais, uma vez que os impactos das oscilações climáticas na sociedade estão associados aos eventos extremos de precipitação. Segundo Marengo & Nobre (2009), embora os eventos extremos climáticos sejam fenômenos naturais ocasionados pela interferência nos padrões dos sistemas meteorológicos, podendo ser considerados: extremo de curto prazo (relacionado ao tempo) ou extremo a médio prazo (relacionado ao clima); ao longo do tempo, têm sofrido influência das ações antrópicas contribuindo em sua frequência e intensidade.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2021), um evento climático extremo é um evento raro em um determinado local e época do ano. As definições de raro variam, mas um evento climático extremo normalmente seria tão raro ou mais raro que o percentil 10 ou 90 de uma função de densidade de probabilidade estimada a partir de observações. Por definição, as características do que é chamado de clima extremo podem variar de lugar para lugar em sentido absoluto. Quando um padrão de condições climáticas extremas persiste por algum tempo, como uma estação, ele pode ser classificado como um evento climático extremo, especialmente se produzir uma média ou total que seja em si extremo (por exemplo, seca ou chuvas fortes durante uma estação).

O Brasil possui dados limitados de séries históricas (com mais de 30 anos) e uma má cobertura espacial, bem como a ausência de arquivos dos desastres. Dado esse fator, há uma grande dificuldade em definir limiares de chuva que possam deflagrar deslizamentos em diferentes municípios no Brasil. Além disso, sendo este tipo de desastre, de natureza complexa, outros fatores também podem influenciar na definição de limiares tais como o tipo de solo, topografia, ocupação e mudança no solo e a chuva (CAMARINHA, 2016).

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos climáticos, em virtude dos impactos nos diversos setores da sociedade, pois quando há chuvas intensas, as perdas são desastrosas.

Considerando que em Belo Horizonte, registra-se uma média anual de 400 deslizamentos a cada período chuvoso, o que implica em inúmeros prejuízos e até perda de vidas humanas (PARIZZI, 2010), o objetivo deste estudo é caracterizar os eventos extremos de precipitação deflagradores de deslizamentos no município de Belo Horizonte em Minas Gerais. Além disso, uma das etapas do estudo foi a classificação de limiares de intensidades de chuva a partir de base de dados de séries históricas de estações pluviométricas distribuídas no município.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Deslizamentos

Deslizamento pode ser definido como movimento de descida de solo e/ou rocha, em declive, através da ruptura de uma superfície onde a maior parte do material move-se em conjunto, como uma massa coerente ou semi coerente, com pouca deformação interna (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008). No presente projeto serão tratados com definição semelhante aos deslizamentos os seguintes termos: movimento de terra e de massa, escorregamentos e deslizamentos de terra. De acordo com o Manual de Deslizamentos – Um guia para compreensão de Deslizamentos (2008), esses podem ser classificados em diferentes tipos com base na categoria de movimento e no tipo de material envolvido. A Tabela 1 abaixo demonstra que há diversos tipos de movimentos de massa, cada qual com suas características e particularidades. Alguns destes, como rastejo escorregamento translacional ou planar, quedas, escorregamento circular ou rotacional e escorregamento em cunha, são considerados comuns no território brasileiro (PARIZZI, 2004).

Tabela 1- Características dos principais grupos do processo de deslizamentos

Rastejo (Creep)	Queda (Falls)
• Vários planos de deslocamentos (internos); • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes c/ a profundidade; • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; • Geometria indefinida .	• Sem planos de deslocamento. • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado. • Velocidades muito altas (vários m/s). • Material rochoso. • Pequenos a médios volumes. • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. ROLAMENTO DE MATAÇÃO TOMBAMENTOS
Escorregamentos (Slides)	Corridas ou fluxos (Flow)
• Poucos planos de deslocamentos (externos); • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); • Pequenos a grandes volumes de material; • Geometria e materiais variáveis: PLANARES = solos pouco espessos, solos e rochas com planos de fraqueza; CIRCULARES = solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; EM CUNHA = solos e rochas com dois planos de fraqueza.	• Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; • Desenvolvimento ao longo das drenagens; • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); • Mobilização de solo, rocha, detritos e água; • Grandes volumes de material; • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: PARIZZI, 2004.

Sabe-se que deslizamentos de terra ocorrem em todas as partes do mundo, independente das condições climáticas e do terreno, sendo responsáveis por milhares de mortes e prejuízos econômicos todos os anos. De acordo com Highland (2008), esse tipo de desastre, que é caracterizado como problema local, pode impactar, tanto social quanto financeiramente, em níveis estaduais e até mesmo nacionais. Ainda segundo o autor, os deslizamentos afetam estruturas feitas pelo homem, quer que seja diretamente sobre a estrutura ou perto de um deslizamento, além de habitações construídas em encostas instáveis, que podem sofrer danos parciais ou completa destruição, pois os movimentos podem desestabilizar ou destruir as fundações, paredes, propriedades circundantes e instalações subterrâneas ou acima do solo.

Xavier et al (1996), afirmam que os riscos de natureza mais frequente no Município de Belo Horizonte relacionam-se com as inundações, a erosão, os desmoronamentos e os deslizamentos de encostas. A pluviosidade foi considerada por Cruden & Varnes (1996) como o componente climático mais importante nos processos de instabilização de encostas e deslizamento de terras, sendo que esses movimentos de massa geralmente estão relacionados com chuvas intensas e duradouras, que podem agir de diversas formas como, por exemplo, na elevação do nível freático do terreno, reduzindo a tensão efetiva e gerando forças de percolação da água; no preenchimento das falhas, fendas e/ou trincas dos materiais localizados na subsuperfície com geração de pressão hidrostáticas; aumento da umidade e, consequente, redução da resistência dos solos pela perda de sucção e coesão aparente. Um dos estudos pioneiros sobre deslizamentos, foi realizado no Estado de São Paulo, sendo a correlação entre chuva e deslizamentos para a região de Cubatão-SP, elaborada por Tatizana et al. (1987a e 1987b), que se baseia no levantamento de dados de deslizamentos e chuvas acumuladas e horárias para um período de mais de 30 anos. Esses autores obtiveram uma curva que correlaciona os registros de deslizamentos com a precipitação acumulada (em mm), para um período de 84 horas, e com a intensidade da precipitação (mm/h) (Figura 1).

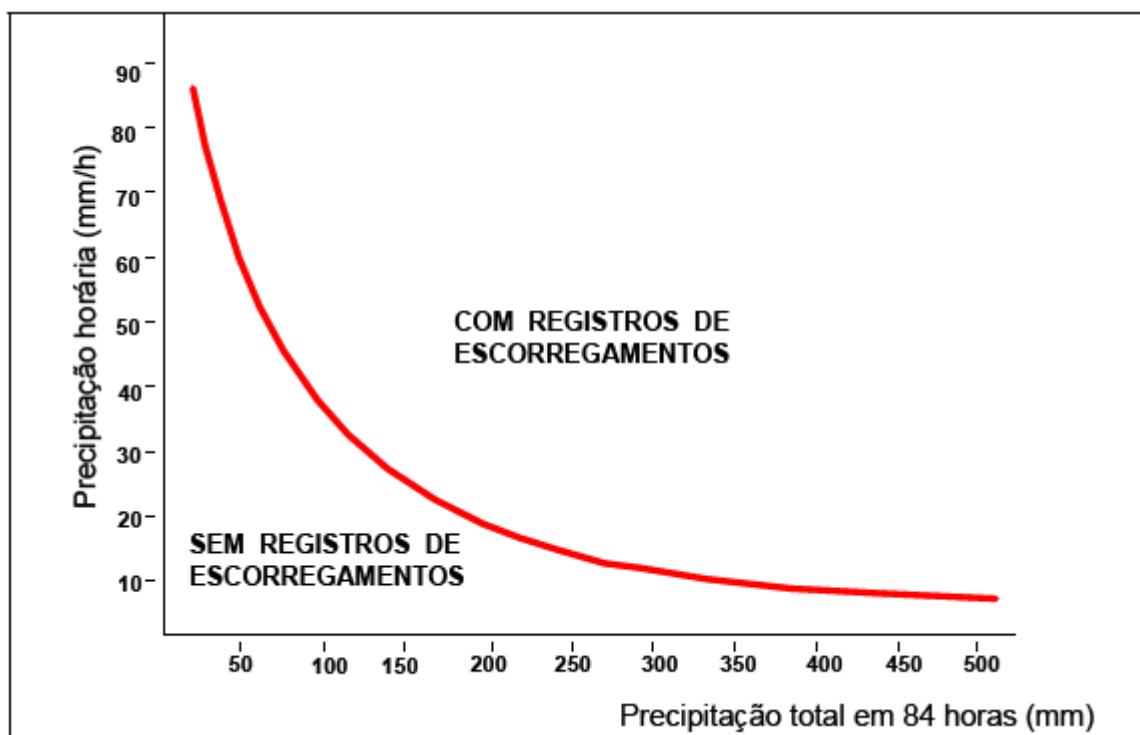


Figura 1- Registros de deslizamentos com a precipitação acumulada (em mm), para um período de 84 horas, e com a intensidade da precipitação (mm/h)

Fonte: TATIZANA, 1987a.

Os deslizamentos de terra causados por chuvas antecedentes a um período de 24 horas referem-se a movimentos de massa de solo que ocorrem como resultado da saturação do solo devido a chuvas ocorridas nas horas ou dias anteriores. Chuvas anteriores podem saturar o solo, reduzindo sua coesão e aumentando sua suscetibilidade a deslizamentos de terra. Mesmo quantidades relativamente pequenas de chuva ao longo de um período prolongado podem levar à saturação do solo, especialmente em áreas com solo permeável ou com baixa capacidade de drenagem (TATIZANA, 1987a).

O gráfico do estudo (Figura 1) demonstra que nesse período já havia uma correlação de chuvas e deslizamentos. No entanto, foram avaliados no trabalho, que muitas vezes não houve chuvas ou acumulados suficientes para desencadear tantos deslizamentos. No entanto as chuvas antecedentes de dias ou semanas também desempenham um papel fundamental na desestabilização de locais vulneráveis aos deslizamentos. As chuvas vão se acumulando pouco a pouco no solo, o que aumenta a umidade e saturação, desencadeando um deslizamento. Portanto, as precipitações nos fenômenos de instabilização de encostas assumem papel de agente de ação progressiva e instantânea. Progressiva porque com as chuvas antecedentes o

terreno é preparado e alterado, evoluindo com o decorrer da chuva. Então pode-se afirmar, segundo Tatizana (1987a) que o número de dias de chuva anteriores podem apresentar influência efetiva nos deslizamentos.

2.2 Contextualização dos eventos extremos de precipitação na ocorrência de deslizamentos

No Brasil, os deslizamentos em encostas são responsáveis por grande parte dos registros de vítimas fatais de desastres naturais e esses são decorrentes de um conjunto de fatores (agentes) que atuam no ambiente ao longo do tempo, sendo determinados ou afetados por eventos naturais e por interferências humanas (CARVALHO & GALVÃO, 2016). Dentre as interferências naturais, encontram-se os eventos extremos de precipitação. Marengo et al. (2009), afirmam que nas últimas décadas a evolução de ocorrências dos eventos extremos de precipitação vem crescendo de forma intensa e com durabilidade significativa, favorecendo a ocorrência de desastres naturais, como inundações, enxurradas, alagamentos, deslizamentos, secas e estiagens.

Já as interferências humanas, têm-se as ocupações desordenadas em encostas e áreas de risco, corte incorreto do talude e uso e ocupação do solo de modo irregular, dado que muitas vezes, sem acesso à moradia e aos terrenos legalizados, as classes populares tiveram como principal alternativa habitacional a autoconstrução e a ocupação de terrenos públicos ou privados com menor valor de mercado em função das restrições a ocupação legal.

A literatura mostra que a maior influência na ocorrência de deslizamentos está relacionada às altas intensidades de precipitação, independentemente de a precipitação anual estar próxima ou não da média esperada (Huang et al., 2015). Diante do crescente aumento das ocorrências de processos geodinâmicos no país torna-se importante compreender cada vez mais seus fatores condicionantes e deflagradores. Investigações de relações entre movimentos de massa e chuva podem auxiliar significativamente nas ações de prevenção e redução de desastres no Brasil. Vários estudos apresentaram uma correlação positiva entre estas variáveis, tentando identificar limiares de precipitação que geram deslizamentos, destacando a peculiaridade da regionalidade desta informação (Santos et al., 2023). Dentre os fatores condicionantes, segundo Tatizana et al. (1987a), a precipitação pode influenciar os processos de instabilização em uma encosta de forma progressiva ou instantânea. Outros fatores que também induzem os

deslizamentos nas encostas são: a textura e estrutura do substrato, baixa declividade e solos com alto teor de saturação. As chuvas de alta intensidade e curta duração além de favorecerem o escoamento superficial podem - se associar aos fenômenos como a erosão, salpicamento e desenvolvimento de linhas de fluxos (forças de percolação) que colaboram para a ocorrência de deslizamentos em encostas mais suscetíveis a estes movimentos (DAMASCENO & CARDOSO, 2018).

Estudos afirmam, (TATIZANA et al., 1987a & TATIZANA et al., 1987b), que as situações de maior risco de deslizamentos são eventos de chuvas contínuas, com picos de intensidade no final do evento chuvoso. De acordo com o Plano de Emergência Pluviométrica de Minas Gerais (2022), a estação chuvosa de 2019/2020 contou com episódios de grandes volumes de precipitação em um intervalo mínimo de tempo em quase todo território mineiro. Em Belo Horizonte, por exemplo, registrou-se 966 mm de chuva, o que representa cerca de 200% a mais que a média dos últimos anos. Desta forma, faz-se imprescindível compreender as dinâmicas da chuva através de dados meteorológicos como fontes que mapeiam informações diárias, mensais e anuais, de forma precisa e real. Os desastres prejudicam a prestação dos serviços essenciais, especialmente os relacionados com a distribuição de energia elétrica e com o saneamento básico, deixam cidades e comunidades isoladas, comprometem a coleta de lixo e, além disso, contribuem para o aparecimento de epidemias dentro da área afetada nos municípios. Em Minas Gerais, o passivo histórico materializado pela construção de cidades inteiras às margens de importantes rios ou nas encostas íngremes, insere parte do Estado num contexto de atenção quando as ameaças e vulnerabilidades caminham juntas (PLANO DE EMERGÊNCIA PLUVIOMÉTRICA, 2022).

O último período de chuvas em Minas (2019/2020) foi o mais agressivo do ponto de vista de danos humanos, com 74 mortes contabilizadas diretamente pelos desdobramentos provocados pelas chuvas, afirma o Plano de Emergência Pluviométrica de Minas Gerais (PEPMG) (2022). De acordo com registros do Gabinete Militar de Minas Gerais/Coordenadoria Estadual da Defesa Civil (GMG/CEDEC, 2021), 88% dos óbitos relacionados às chuvas em Minas Gerais, foram causados por: movimentos de massa ou deslizamentos (42%), enxurradas (33%) e descargas elétricas (9%) (Figura 2).

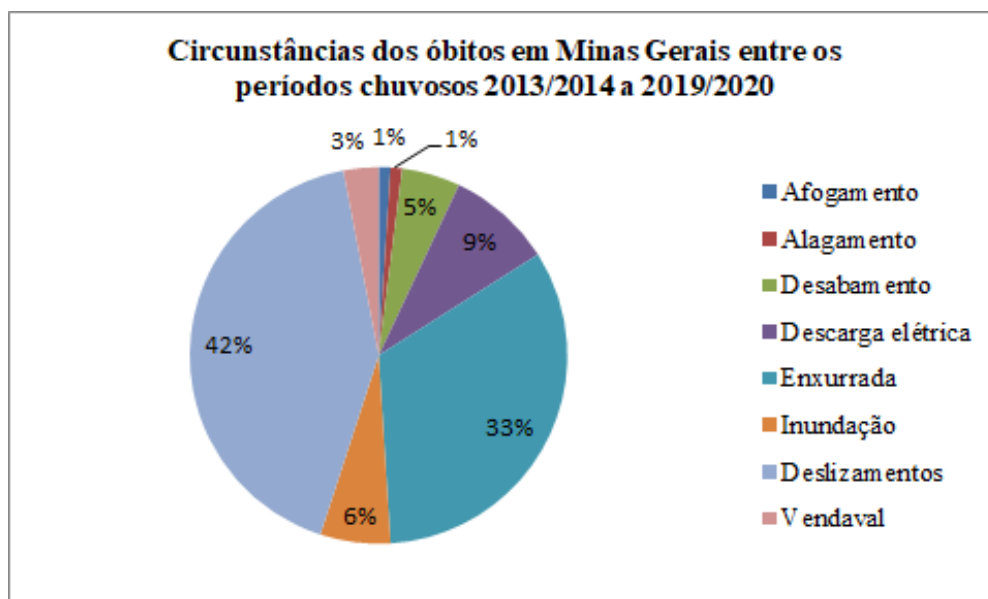


Figura 2- Circunstâncias dos óbitos em Minas Gerais entre os períodos chuvosos 2013/2014 a 2019/2020

Fonte: Defesa Civil de Belo Horizonte, 2021/ Adaptado pela autora deste trabalho, 2022.

Destacam-se de forma mais recente os eventos pluviométricos registrados no início de 2020 na capital mineira, sendo que o total de chuva acumulado nos meses de janeiro, fevereiro e março foi de 1624 mm, sendo que a média anual para a região é de 1603 mm, aproximadamente (CLIMATEMPO, 2020). Porém, o mais agravante é que de acordo com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), Belo Horizonte registrou, em 24 horas, o maior volume de chuva contínua em 110 anos: das 9h de 23 de janeiro até 9h de 24 de janeiro, a cidade recebeu 171,8 mm de chuva. O volume recorde de chuva provocou vários deslizamentos e mortes na Região Metropolitana (NASCIMENTO et al., 2020).

O Plano de Emergência Pluviométrica de Minas Gerais (2022) dispõe de diretrizes para a comunidade e tomadores de decisões para a minimização de danos causados pela chuva. Nesse contexto, sabendo que Minas Gerais é suscetível à ocorrência de eventos extremos, naturais ou não, é fundamental que todos invistam na Gestão do Risco de Desastre, que além dos benefícios elencados, tornam a Gestão do Desastre mais rápida, econômica e eficiente. O PEPMG ainda afirma que o caminho para se minimizar os impactos é simples: se a comunidade estiver orientada e preparada para enfrentar os eventos adversos, vidas serão poupadas e menores serão os impactos econômicos e ambientais. Uma comunidade ativa e bem-organizada responderá adequadamente a uma emergência e contribuirá para melhorar a qualidade da

assistência e recuperação, contribuindo para as mais diversas elaborações de procedimentos que disponha da compreensão e interpretação das variáveis meteorológicas, como dinâmica das precipitações em seus diferentes espaços e frequências, associadas a outros sistemas, possibilitando projeções de cenários futuros possíveis. (FREITAS et al., 2019).

2.3 Contextualização da obtenção de limiares críticos de precipitação como ferramenta de prevenção aos deslizamentos

Os estudos de correlação entre chuva e deslizamento podem auxiliar na determinação de melhores limiares críticos de precipitação, contribuindo para o aumento da eficácia das ações da defesa civil na redução de riscos a deslizamento por meio de análises específicas para cada município. De acordo com Huang et al. (2015), é importantíssimo que os Estados e cidades desenvolvam estudos de limiares de precipitação que resultam em deslizamentos de terra, onde apontam a intensidade da chuva e o acumulado em um período de até 4 dias, seguindo a metodologia de Tatizana et al., (1987a).

No entanto, como os eventos de deslizamentos de terra são corriqueiros e acontecem em todo mundo, é importante a avaliação regional, considerando-se as diferenças de padrões de uso e ocupação do solo, das feições do relevo e da drenagem, das características da precipitação, das ocupações desordenadas, dentre outros aspectos (DAMASCENO & CARDOSO, 2018). A quantidade de chuva é o parâmetro ambiental mais utilizado para obtenção de limiares críticos para uso em sistemas de alerta antecipado, devido à sua notória relevância nos processos de preparação e deflagração dos deslizamentos sendo que os limiares pluviométricos determinados por meio de modelos empíricos baseiam-se geralmente em eventos reais de chuva e nos deslizamentos diretamente relacionados a eles.

Há, em geral, duas formas de se delimitar os limiares: estatisticamente, com base no histórico observado; ou com base no período de retorno, período até que um evento de determinada magnitude se repita (SENEVIRATNE et al., 2012). Os limiares de precipitação deflagração de deslizamentos são obtidos, no método mais comum, pela análise de chuvas, por meio de dados de pluviômetros, e observando quais dessas ocasionaram deslizamentos ou não. Num primeiro momento é necessário estabelecer uma correlação entre chuvas e deslizamentos que indicará quais valores de chuva têm maiores chances de deflagrar deslizamentos, e a partir desses valores de chuva são estabelecidos níveis de alerta para a

emissão de avisos e alarmes para a população (CALVELLO, 2015).

Todavia, Damasceno & Cardoso (2018) afirmam que comumente, os estudos de correlação entre chuva e deslizamentos no Brasil destacam a dificuldade de se determinar limiares críticos para deslizamentos induzidos pela precipitação devido aos dados de ocorrências serem oriundos de atendimentos no meio urbano (áreas habitadas), onde se observa a influência da interferência antrópica na instabilidade das encostas ou taludes (incluindo cortes e aterros, lançamento de águas servidas e entulho etc.). Mesmo com a dificuldade enfrentada no Brasil, há estudos pioneiros em diversas regiões do país que destacam os limiares de precipitação que podem desencadear os deslizamentos (Tabela 2). Os limites de precipitação propostos por diferentes autores de acordo com as características das regiões por eles pesquisadas mostram a importância de estudos específicos para aumentar a eficiência das ações de redução e prevenção de riscos baseadas nas condições meteorológicas (DAMASCENO & CARDOSO, 2018).

Tabela 2- - Valores limites de precipitação relacionados a eventos de deslizamentos em diferentes cidades brasileiras determinados empiricamente por pesquisadores da área

Autor e ano	Local	Valores limites de precipitação
Guidicini; Iwasa, 1977.	Nove áreas da costa do Brasil entre Ceará, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina.	Limite de 8 a 17% de pluviosidade anual. Com 20% da pluviosidade anual, desenvolvem-se fenômenos catastróficos.
Tatizana et al., 1987a.	Cubatão - São Paulo	Acumulada de precipitação de quatro dias; Equação: $I (AC) = 2.603 Ac^{-0.933}$ Onde: I = intensidade horária da precipitação (mm), Ac = precipitação (mm) acumulada de quatro dias
Elbachá et al., 1992.	Salvador - Bahia.	Limite indicativo de 120 mm/4 dias.
Xavier, 1996.	Belo Horizonte- Minas Gerais	Limite de 30 mm/24h e 50 mm/2 dias.
Alheiros, 2003.	Olinda - Pernambuco	Maior chance de instabilidade de massa para $R > 60.000 \text{ mm}^2$. Equação: $R = Pac \cdot I$ Onde: R = Relação entre os níveis piezométricos e a precipitação (mm^2/dia), I = intensidade da chuva (mm) e Pac = precipitação acumulada desde o início da estação chuvosa (mm).

Vieira, 2004	Blumenau - Santa Catarina	Boa relação com chuva acumulada de três a quatro dias, somando em torno de 50 mm
Ide & Macedo, 2005	Campinas - São Paulo (área de rochas cristalinas)	Acumulado de 6 dias e 95 mm/24h. Equação: $p_{24h} = 0,0029(p_{6d})^2 - 1,0824(p_{6d}) + 94,462$ Onde: p_{24h} = precipitação acumulada em 24 horas (mm); p_{6d} = precipitação acumulada nos seis dias anteriores ao escorregamento (mm).
Soares e Marton, 2008	Angra dos Reis - Rio de Janeiro	Acumulado de precipitação em dois dias e patamar crítico de 75 mm/24h.
Santoro et al., 2010.	Campinas, Baixada Santista, Litoral Norte, Sorocaba, ABCD, e Vale do Paraíba - São Paulo.	Boa correlação com chuva acumulada de três dias e meio, e com quatro dias. Limite de 60 a 100 mm em quatro dias.
Castro et al., 2012	Ouro Preto – Minas Gerais	Boa correlação com chuva acumulada de cinco dias. Limite (nível de atenção) de 22 a 128 mm/5dias Equação: $PD = 6386,6 PA - 1,3847$, Onde: PD= precipitação diária no dia da ocorrência(mm) e PA= precipitação acumulada em cinco dias, excluindo a precipitação do dia do escorregamento.
Soares e Ramos, 2015	João Pessoa - Paraíba	Boa correlação com chuva acumulada de oito dias. Equações: $PD = 2160,6 PA - 0,72$ (para registro de apenas um movimento no dia), $PD = 2253,2 PA - 0,653$ (para registro de dois ou três movimentos no dia) e $PD = 2938,6 PA - 0,67653$ (para registro de mais de três movimentos no dia). Onde: PD= precipitação diária no dia do evento de deslizamento (mm) e PA= precipitação acumulada anterior ao evento (mm).
Molina et al., 2015.	São Bernardo do Campo – São Paulo Região	Limite de 50 mm/24h e 150 mm/4 dias.
Bandeira e Coutinho, 2015	Metropolitana de Recife - Pernambuco	Boa relação com chuva concentrada de quatro dias ou menos e acumulada de longo prazo.

Mendes et al., 2015	São José dos Campos - São Paulo	Limite de 20 a 50 mm/24h e precipitação acumulada acima de 50mm/3dias.
------------------------	---------------------------------------	---

Fonte: DAMASCENO & CARDOSO, 2018/ Adaptada pela autora deste trabalho,
2022.

Ainda segundo Damasceno & Cardoso (2018), as análises da relação entre escorregamento e precipitação, via estudos empíricos, que viabilizem a determinação de parâmetros de chuva crítica e limiares específicos para cada município e/ou local de risco, podem ajudar na compreensão dos processos envolvidos na relação chuva-deslizamento, auxiliar na decisão de possíveis ações de prevenção a deslizamentos em áreas urbanas, presentes nos planos e sistemas de alerta municipais, contribuir para o aprofundamento da compreensão de fatores geoambientais que auxiliam na deflagração dos movimentos de massa, colaborar para a elaboração dos mapas de risco, suscetibilidade e carta de aptidão à urbanização e também auxiliar na atualização e elaboração de bancos de dados de ocorrências de deslizamentos e chuva crítica.

Estudos com esta abordagem podem contribuir para a melhoria dos programas e planos utilizados pelas defesas civis e na diminuição dos danos humanos por ocorrência de processos geodinâmicos, auxiliando, portanto, na implantação de medidas preventivas na gestão do risco e planejamento da expansão urbana no Brasil.

3 PROPOSTA DE PESQUISA

O objetivo principal do presente estudo é avaliar os eventos extremos de precipitação a partir da análise de séries históricas de precipitação diária, de modo a identificar limiares críticos de chuvas que possam desencadear os episódios de deslizamentos na cidade de Belo Horizonte.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

O município de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, é a sexta maior capital do Brasil, de acordo com dados do Censo de 2010 (IBGE, 2010). Localizada na região central do estado (Figura 3), tem uma população de aproximadamente 2 milhões e 375 mil pessoas de acordo com estimativas do último censo. A cidade possui cerca de 45% do seu território com susceptibilidade de deslizamentos de terra devido a três fatores principais: a ocupação humana desordenada, principalmente em áreas de risco, a intensificação das chuvas e dos períodos pluviométricos e o perfil geológico do município (IBGE, 2019).

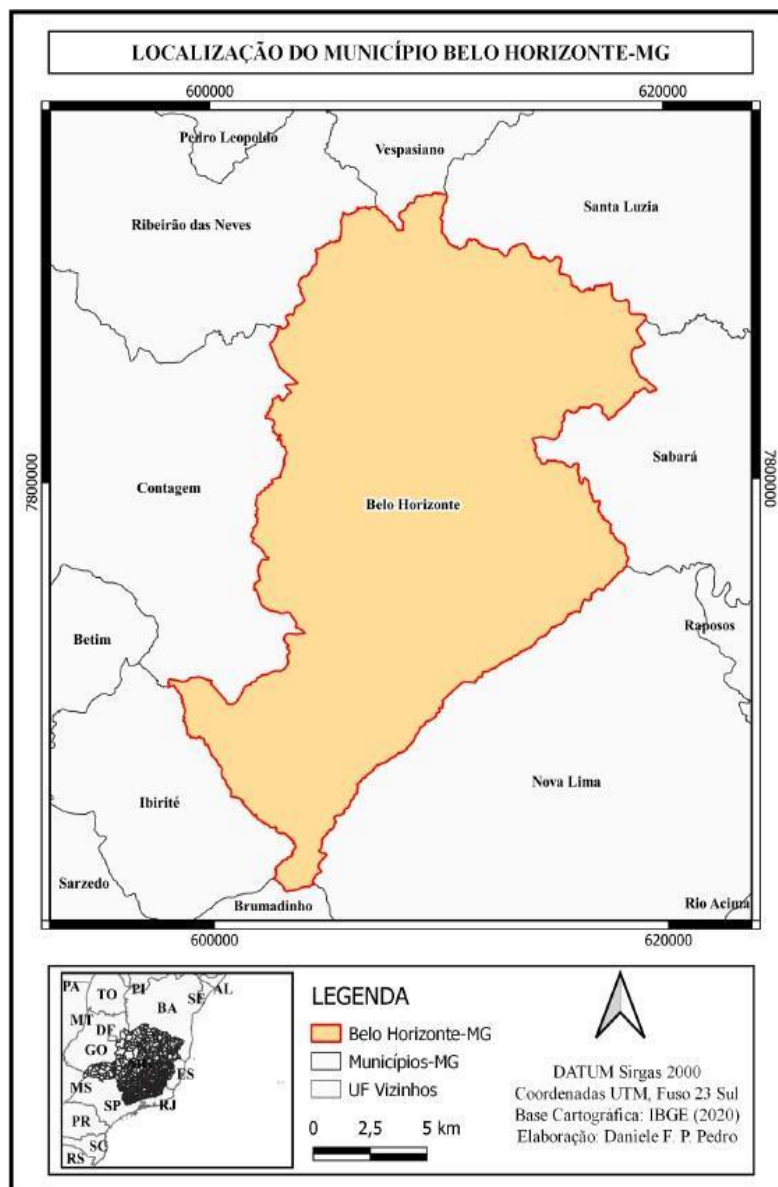


Figura 3- Mapa do município de Belo Horizonte em Minas Gerais

Fonte: Autora deste trabalho, 2023.

A cidade de Belo Horizonte aparece entre as primeiras posições no ranking de proporção de pessoas vivendo em áreas de risco no país. De acordo com o relatório “Populações em Área de Risco no Brasil” do IBGE e do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), a cidade aparece em quarto lugar, com 16,4% da sua população, aproximadamente 390 mil domicílios, construídos em áreas de risco. Ademais, o município é dividido em 9 regionais: Norte, Nordeste, Noroeste, Leste, Centro Sul, Oeste, Pampulha, Venda Nova e Barreiro. Dentre essas regionais, as regionais Barreiro, Leste, Oeste

e Centro-Sul, acumulam a maior parte dos setores censitários classificados como área de risco e também cerca de 50% dos domicílios removidos pela prefeitura da cidade entre 2010 e 2019 (MOREIRA & BARBIERI, 2020).

Belo Horizonte é marcada por diferenças socioeconômicas entre suas regionais e bairros, e, ainda marcada por características geomorfológicas que acentuam as desigualdades entre essas regiões. As regiões sul e sudeste da cidade contêm as maiores altitudes (Figura 4) e maiores índices de declividade, nessas regiões também estão concentradas boa parte das atividades econômicas e financeiras do setor de serviços, ademais, estão concentradas também a maior parte dos setores censitários que são classificados como áreas de risco (MOREIRA & BARBIERI, 2020). Em termos de distribuição altimétrica da cidade, é possível afirmar que Belo Horizonte possui altitudes entre 675m e 1505m, uma vez que está inserida em área com predominância de relevo planáltico (CRUZ et al, 2019).

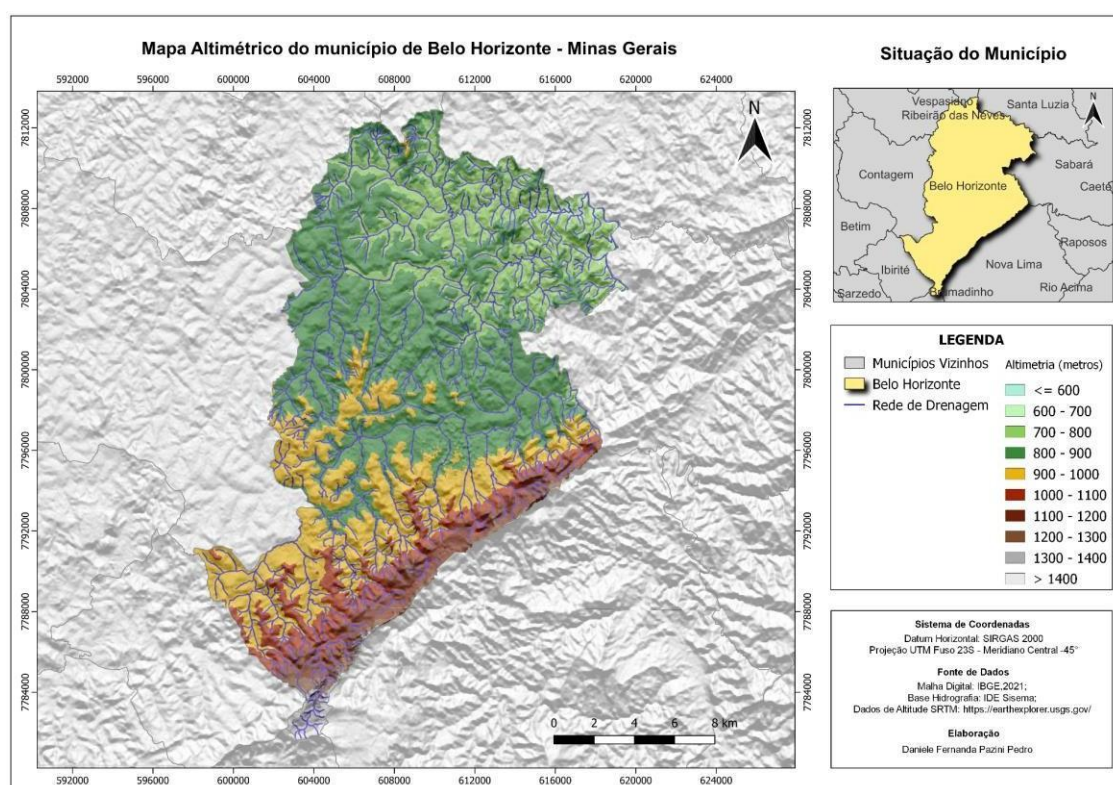


Figura 4- Mapa Altimétrico do município de Belo Horizonte

Fonte: Autora deste trabalho, 2023.

4.2 Avaliação do padrão espacial dos eventos extremos de chuvas no município de Belo Horizonte

A observação temporal das chuvas é de grande interesse, contudo, notam-se diferentes técnicas para observação espacial e temporal dessas. Para tanto, tendências por meio de observações em estações pluviométricas compreendem a principal forma para seu entendimento e suas vinculações, como em frequência, picos de variância, significância, entre outros aspectos estatísticos. Nesses, vale ressaltar a importância da observação das tendências temporais e espaciais das chuvas por meio de índices climáticos, em seu volume, e em valores diários acumulados (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; HAYLOCK et al., 2006), da correlação entre as chuvas e anomalias.

Para a realização da análise temporal dos eventos extremos em Belo Horizonte, calculou-se índices de extremos climáticos a partir de séries históricas de precipitação. Considerando que é necessário estudar séries temporais mais completas para o cálculo deste índices, eles foram calculados a partir de dados das estações distribuídas ao longo do município, sendo essas “Buritis, Cercadinho, Horto, Pampulha e a estação 83587”. Essas estações foram obtidas mediante os dados das séries históricas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e da Hidroweb, site de séries históricas da Agência Nacional de Águas.

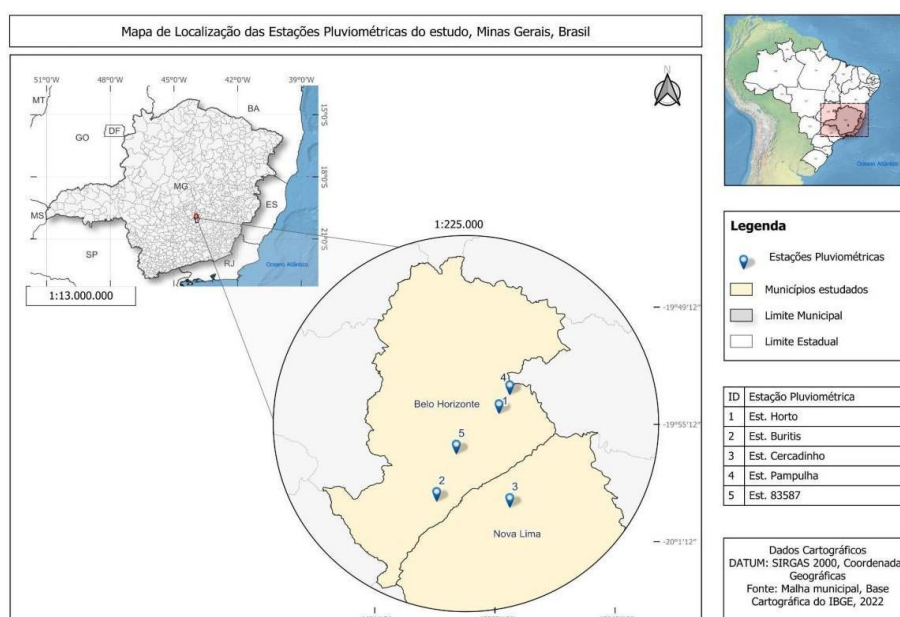


Figura 5- Mapa de localização das Estações Pluviométricas

Fonte: Autora deste trabalho, 2023.

As 5 estações utilizadas são as descritas na Tabela 3 e demonstradas na Figura 5. As distâncias entre as estações são equivalentes a:

- Horto a Buritis: 6,9 km;
- Buritis a Cercadinho: 7,6 km;
- Cercadinho a Pampulha: 21 km;
- Pampulha a 83587: 11,4 km;
- 83587 a Horto: 9,1 km.

Tabela 3- Informações das Estações Pluviométricas utilizadas

Estação Pluviométrica	Coordenadas Geográficas			Porcentagem de falha (%)	Altitude (m)
	Latitude	Longitude	Período		
Horto	-19.97	-439.167	1961 a 2019	0,0992	915
Buritis	-199.748	-439.685	2007 a 2021	20,147	894
Cercadinho	-199.799	-439.586	2013 a 2021	1,4344	1199,55
Pampulha	-198.833	-439.694	2006 a 2021	1,1864	854,02
83587	-199.344	-439.522	1961 a 2022	0,0763	915,47

Fonte: Autora deste trabalho, 2023.

4.3 Índices Climáticos RX1 e RX5

Há uma grande importância na observação das tendências temporais e espaciais das chuvas por meio de índices climáticos, em seu volume, e em valores diários acumulados (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; HAYLOCK et al., 2006). O índice RX1, tem como função

apresentar o máximo de chuva acumulado em único dia ao longo da série histórica na região de estudo. Esse índice se destaca por representar a chuva diária nos meses e anos da série de dados adotada (DOS SANTOS et al., 2018). O cálculo do RX1 determina o volume de chuva diária mais intenso em cada mês de cada ano. Entretanto, dada a ocorrência dessas se concentrarem nos meses de maior valor pluviométrico acumulado, considerou-se o maior valor anual para cada ano, em cada estação analisada.

Para o cálculo do RX1 foram somados todos os valores de precipitação total diária de todos os dias de cada ano, até obter o valor do ano em questão.

Já o índice RX5, tem como função calcular e apresentar o número máximo de chuva acumulado em cinco dias durante ao longo da série histórica, na região de estudo. Utilizou-se também a ferramenta Excel, o qual calculou o acumulado de 5 dias consecutivos dos valores diários de precipitação.

4.4 Áreas de risco, uso e ocupação do solo inadequado, relevo e vulnerabilidade

4.4.1 Área de Risco

De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2021), áreas de risco podem ser definidas como uma área passível de ser atingida por processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Normalmente, essas áreas correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (assentamentos precários) (CPRM, 2021).

De acordo com o relatório “Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios de 2007”, pode-se entender área de risco como:

“A área de risco é a área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais” (CARVALHO et al, 2007, página 26)

Para a caracterização da área de risco de Belo Horizonte, foram utilizados dados da Prefeitura do município, dados de programas como a Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte (URBEL), o Programa Estrutural em Área de Risco (PEAR), dados da Defesa Civil do município, além de noticiários utilizados de forma complementar.

4.4.2 Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Município

Foram realizadas pesquisas para obter informações e dados a respeito da área estudada em órgãos oficiais como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e em referências bibliográficas de estudos realizados na área de estudo, assim como a aplicação de técnicas de geoprocessamento para o tratamento de dados e produção de informações cartográficas sobre o uso e ocupação do solo na região.

Os dados utilizados de uso e ocupação do solo foram adquiridos do projeto MAPBIOMAS (2020). O Projeto MapBiomas, iniciado em 2015, é uma iniciativa de diversas universidades, Organizações Não Governamentais (ONGs) e companhias privadas. O projeto tem como objetivo desenvolver uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para produzir séries anuais de uso e ocupação do solo em todo o território brasileiro. Os mapas disponibilizados são da seção “mapa de coleções”, onde foram utilizadas as bases cartográficas de Uso e Cobertura da Terra. Os mapas disponibilizados pelo MapBiomas foram elaborados a partir de imagens de satélite LandSat, com resolução de 30 metros, mosaicos de imagens de satélites para cada ano da série histórica de um local determinado, sendo que cada mosaico pode possuir até 105 camadas de informações com as bandas espectrais, frações e índices, podendo estes serem acessados diretamente no Google Earth Engine (MapBiomas, 2020).

As imagens da área de estudo foram adquiridas em formato GeoTiff, por meio da plataforma GEE, provenientes do mapeamento do MapBiomas para uma data especificada.

4.4.3 Relevo e Vulnerabilidade

4.4.3.1 Mapa de Declividade do município

No contexto ambiental, de acordo com CUNHA et al., (2003) as formas de relevo e os processos geomorfológicos têm grande importância, tanto pelo fato de constituírem o substrato físico sobre o qual se desenvolvem as atividades humanas, como por responderem, muitas vezes de forma agressiva, às alterações provocadas por tais atividades. Desse modo, a representação cartográfica do relevo torna-se um instrumento imprescindível para a caracterização adequada de uma região, principalmente na validação dos episódios de deslizamentos. O conhecimento da dinâmica climática regional sobre a configuração do relevo como dinamizador dos regimes de precipitação (CANDIDO & NUNES, 2008) é um fator importante para a região em estudo,

pois, podem acarretar valores pluviométricos diferenciados, em locais susceptíveis a deslizamentos. Nesse contexto, a avaliação do padrão espacial e temporal das chuvas assume grande importância.

Conhecer a declividade de um terreno é importante para estudos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos (PEREIRA & LOMBARDI, 2004). Portanto, foi gerado o mapa de declividade do terreno de Belo Horizonte, a fim de determinar o quanto a declividade influencia nos deslizamentos.

Inicialmente, calculou-se a declividade, onde foram utilizados arquivos em SRTM. Para o cálculo, foi dividido a declividade em classes para facilitar a compreensão do relevo da região. A declividade por padrão é calculada em graus, como na maioria dos estudos. Para as classes, foi utilizada a bibliografia da Embrapa (1979), onde têm-se as classes de declividade e os limites percentuais (tabela 4).

Tabela 4- Classes de declividade

Classes de Declividade propostas pela Embrapa, 1979	
Classes de Declividade	Limites Percentuais (%)
Plano	0-3
Suave Ondulado	3-8
Ondulado	8-20
Forte-Ondulado	20-45
Montanhoso	45-75
Escarpado	>75

Fonte: EMBRAPA, 1979.

Para desenvolver o mapa de declividade, foi preciso reclassificar o arquivo de declividade para as classes propostas. Para isso, foi utilizado o algoritmo “reclass” do Qgis, do módulo sextante. Esse algoritmo proporcionou um fatiamento do raster de declividade. Com o algoritmo reclass, a nova face para a criação do fatiamento da declividade ficou como demonstrado na Figura 6 abaixo.

```

0.0000 thru 3.0000 = 1 PLANO (0-3%)
3.0001 thru 8.0000 = 2 SUAVE ONDULADO (3-8%)
8.0001 thru 20.0000 = 3 ONDULADO (8-20%)
20.0001 thru 45.0000= 4 FORTE-ONDULADO (20-45%)
45.0001 thru 75.0000= 5 MONTANHOSO(45-75%)
75.0001 thru 2000.0000= 6 ESCARPADO ( > 75%)
end

```

Figura 6- Algoritmo reclass para fatiamento das classes da Embrapa (1979)

Fonte: EMBRAPA, 1979.

4.4.3.2 Mapa de vulnerabilidade quanto aos riscos de desastres associados ao clima no município

O mapa de vulnerabilidade foi caracterizado por meio do Índice Operacional para a Análise de Vulnerabilidade (INOV) desenvolvido por Assis Dias et al, (2020) e provido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN. O INOV é um índice populacional de vulnerabilidade cuja finalidade é subsidiar o monitoramento e a emissão de alertas para o risco de desastres associados ao movimento de massa que possam ocorrer em diversos municípios do Brasil (ASSIS DIAS et al., 2020). O índice inclui indicadores que caracterizam tanto a exposição física quanto a capacidade de resposta da população em áreas de risco, áreas estas providas pelo mapeamento da CPRM. Ainda segundo os autores, para o desenvolvimento do INOV, informações detalhadas específicas para o Brasil foram obtidas pela combinação de dados populacionais do censo demográfico com os de áreas de risco de deslizamentos de terra, a qual foi gerada uma associação entre áreas de risco e a população no banco de dados censitário. Para a caracterização das áreas de risco, foi utilizado as condições de vulnerabilidade mapeadas pelo BATER do município, que inclui informações tais como, idade, gênero, renda per capita, número de domicílios, abastecimento de água, saneamento básico, lixo, energia elétrica e vulnerabilidade. Segundo Assis Dias et al. (2020) a vulnerabilidade é classificada em “Muito Alta, Alta e Média” .

4.5 Avaliação do padrão temporal das ocorrências dos eventos de deslizamentos no município de Belo Horizonte

Para a obtenção dos dados de deslizamentos, foram consultadas as bases de dados disponibilizadas pela Defesa Civil do município, pelo Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) e pelos dados internos do CEMADEN. Esses três possuem dados de deslizamentos ocorridos na cidade dentro de um determinado período. A base de dados do CEMADEN apresenta informações desde 2013 até os dias atuais. Já o S2ID dispõe de dados para o período de 2003 a 2012. A base de dados da Defesa Civil inclui dados de 2009 a 2022, sendo este o mais atualizado. Nota-se que a série temporal dos dados do CEMADEN e S2ID são mais curtas em comparação com os da Defesa Civil, no entanto, ainda assim ambas as bases foram utilizadas de forma complementar aos da Defesa Civil.

Após a criação de um banco de dados consolidados com as ocorrências de deslizamentos, foi realizado um levantamento de estações pluviométricas com séries históricas mais completas, para a posterior análise considerando os acumulados de chuvas diários e as ocorrências de deslizamentos. Foram identificadas 5 estações por meio da base de dados “Hidroweb” da Agência Nacional de Águas e da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Como uma forma de filtrar os eventos de deslizamentos mais significativos no município, foram selecionados apenas os eventos que tiveram mais de 5 ocorrências (pontos de deslizamentos) em um mesmo dia. Como passo seguinte, realizou-se o acumulado de chuva de 24h e 120h para os eventos definidos previamente e, posterior cálculo de percentis.

4.5.1 Mapa de Calor (Kernel)

Para gerar o mapa de calor, foi utilizada a técnica de estimador de densidade “Kernel”. Esse tipo de mapa mostra o comportamento padrão de pontos, estimando a intensidade pontual do processo em toda a região de estudo (DRUCK et al., 2004; SOUZA, 2013). A fim de atingir esse objetivo, aplicou-se uma técnica bidimensional na qual uma função é ajustada aos eventos em análise, resultando em uma superfície que reflete a intensidade das amostras por unidade de área. Essa função realiza uma contagem de todos os pontos dentro de um raio de influência específico, atribuindo um peso com base na distância de cada ponto em relação à localização de interesse. Dessa forma, é possível obter uma representação visual que evidencia a densidade de ocorrências na área estudada (DRUCK et al., 2004).

Inicialmente, foi coletado dados da área de estudo, como localização e os pontos onde

ocorreram os deslizamentos no município. Uma vez que os dados de ocorrências adquiridos das diferentes bases não estavam georreferenciados, utilizou-se a Geocodificação do Google Sheets para tanto. Essa geocodificação utiliza um script que localiza as coordenadas geográficas mediante o endereço (rua, bairro, cep, cidade). No entanto, o script devolve as coordenadas em milhar e por seguinte, as coordenadas foram transformadas em decimal e posteriormente em UTM pelo site do IBGE.

4.6 Análise da relação entre os acumulados de chuva diária e a ocorrência de deslizamentos

Atualmente, os limiares empíricos (GUZZETTI et al. 2007, GUZZETTI et al. 2008) são os modelos mais utilizados em sistemas de monitoramento e alerta para prever quais eventos de chuva têm potencial para deflagrar movimentos de massa, especialmente deslizamentos. O limiar pode ser definido como a quantidade mínima de chuva para a possível ocorrência de um movimento de massa (deslizamento) em um determinado período (SEGONI et al. 2018).

Em geral, os limiares de chuva definidos no território brasileiro utilizam acumulados de chuva de 24, 48, 72, 96 ou 120h (GUIDICINI & IWASA 1977; MOLINA et al. 2015) ou associações entre a intensidade da chuva (algumas vezes apenas com dados de 24 h) e a chuva antecedente (TATIZANA et al. 1987).

No presente estudo, para a definição dos limiares, foi utilizada a técnica estatística “percentil”, de modo a determinar quais os limiares de chuvas mais se associaram às ocorrências de deslizamentos no município de Belo Horizonte. Para isso foi utilizado o software RStudio, que é um software livre de ambiente de desenvolvimento integrado para R, sendo usado a biblioteca Readr.”

Lima et al. (2010) utilizaram percentil 99 da precipitação diária para selecionar eventos de chuvas mais intensas sobre toda a Região Sudeste do Brasil, durante o período chuvoso (de novembro a março), e, que possam estar relacionados às ocorrências de deslizamentos. Inicialmente, para cada uma das 5 estações pluviométricas previamente selecionadas, foram calculados os percentis 50, 75, 90, 95 e 99 para chuva acumulada em 24h e 120 h, para todas as séries de dados.

A estimativa dos percentis é baseada apenas nos registros em que a precipitação possui um valor numérico, ou seja, excluem-se os registros sem chuva, assim como calculado por Karl

& Knight (1998). Cinco classes de precipitação são definidas, adaptando-se aos limiares de Groisman et al. (2005):

- Muito Fraca ($\leq$ percentil 50)
- Fraca ($<$ percentil 75);
- Moderada ($\geq$ percentil 75 e $<$ percentil 90);
- Moderadamente intensa ($\geq$ percentil 90 e $<$ Percentil 95)
- Intensa ($\geq$ percentil 95 e $<$ percentil 99);
- Muito intensa ($\geq$ percentil 99).

Para cada uma das estações, os acumulados de chuvas em chv24h e chv120h foram comparados com os valores do percentil 95, a fim de avaliar se tais condições culminaram em ocorrências no mesmo período.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização da área de estudo: Áreas de risco, uso e ocupação do solo, relevo, vulnerabilidade

5.1.1 Áreas de Risco

Belo Horizonte é um município de grande urbanização cujas áreas de risco estão inseridas no contexto de área urbana. Movimentos de massa ocorrem tanto em áreas de alto padrão construtivo quanto em áreas de baixo padrão construtivo, o que reforça a importância dos condicionantes físicos no desencadeamento dos mesmos (PARIZZI et al., 2010). Todavia, nas áreas de vilas e favelas o risco é agravado pela conjugação dos aspectos físicos e de uso da terra. A tipologia das edificações é muito precária, com casas de alvenaria, madeira, lona, telhas de zinco e, até mesmo, de papelão, sendo a paisagem original da região fortemente modificada devido à intervenção antrópica (URBEL, 2010). A erosão é intensa e o padrão de ocupação irregular, o que, somado às características geomorfológicas e lito-estruturais, como altas declividades, vales encaixados e superfícies côncavas, torna o risco de escorregamento alto (PARIZZI et al., 2010).

De acordo com dados do último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população das áreas de risco em relação às características médias da população geral de Belo Horizonte, é composta por grupos com menor renda, sendo em maioria negros e no geral mais jovens e com mais filhos. Já o perfil familiar de domicílio realocado, é

uniparental, chefiado por mulheres, antes habitado em moradias irregulares, com filhos e com renda abaixo de 1 salário mínimo, extremamente inferior à renda média do município de aproximadamente 3 salários mínimos. São famílias mais vulneráveis tanto no contexto da exposição a riscos, quanto no contexto socioeconômico, por estarem em grupos historicamente negligenciados com menor acesso à educação, renda, trabalho formal e moradia de qualidade (MOREIRA & BARBIERI, 2020).

Em Belo Horizonte, existe o Programa Estrutural em Área de Risco (PEAR), que atua há mais de 25 anos em vilas e favelas, com objetivo de evitar acidentes graves e preservar vidas, assegurando proteção para as famílias que residem em áreas de risco geológico e inundação (PEAR, 2023). O trabalho é executado por meio de vistorias, obras de manutenção, intervenções com mão de obra do morador e atividades de prevenção ao risco geológico. As ações preventivas nas áreas de risco em vilas e favelas são desenvolvidas não só no período das chuvas, mas durante todo o ano. A atenção nestas áreas é reforçada por meio de vistorias técnicas e monitoramento constante, principalmente nos locais mais críticos. Quando da chegada das chuvas, os esforços se concentram no atendimento à população.

De acordo com a Prefeitura de Belo Horizonte (2023), quando o local apresenta grau de risco alto ou muito alto, o qual não pode ser eliminado ou controlado por uma obra tecnicamente viável, a família é removida, sendo encaminhada para o Abrigo Municipal Granja de Freitas. Ela também pode acessar o programa Bolsa Moradia até obter o reassentamento definitivo em uma unidade habitacional construída pela Prefeitura. Durante os anos de 2018 a 2022, a Prefeitura de Belo Horizonte realizou 1720 remoções temporárias de casas em áreas de risco, sendo 2020 um dos anos com maiores remoções devido às fortes chuvas.

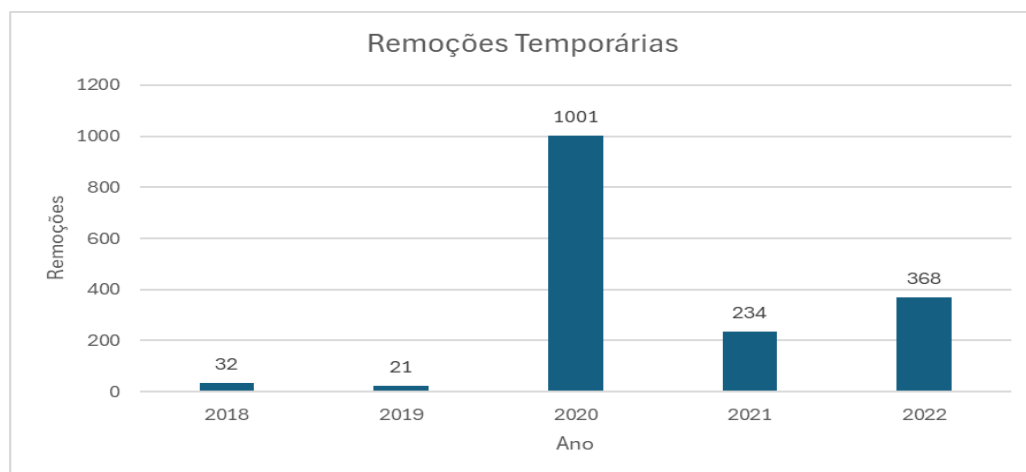


Figura 7- - Remoções temporárias por ano em Belo Horizonte

Fonte: DEFESA CIVIL DE BELO HORIZONTE, 2021.

De acordo com a Câmara Municipal de Belo Horizonte (2020), mais de 200 famílias que vivem às margens do Ribeirão das Onças tiveram suas moradias interditadas e as famílias foram direcionadas ao abrigo da Prefeitura. Segundo a Prefeitura, as remoções preventivas/temporárias são realizadas quando há risco de deslizamento no local. Neste caso, as famílias são encaminhadas para o benefício do Programa Bolsa Moradia e/ou Abono Pecuniário até a definição da intervenção necessária para a área.

Já em 2022, segundo notícias do G1 Minas (2022), mais de 320 famílias foram removidas de casa em Belo Horizonte no período de dezembro de 2021 a março de 2022. Neste mesmo período chuvoso, em janeiro de 2022, uma mulher morreu após a casa em que ela estava desabar, no bairro Vila São João Batista, na Região de Venda Nova, em Belo Horizonte. Em todo o estado, foram 30 mortes registradas por deslizamentos apenas no mês de janeiro (G1 MINAS, 2022)

Em relação às vistorias para futuras remoções e que são solicitadas em períodos de chuva pela população, de acordo com a Prefeitura de Belo Horizonte, no ano de 2020 foram realizadas mais de 2000 vistorias em imóveis atingidos pela chuva e com risco de deslizamento. As principais solicitações vieram das regiões do Jardim Alvorada, Novo Lajedo, Beira Linha, Aglomerado da Serra, Taquaril, Cemig e Vila Ecológica. Os chamados são registrados pelo canal de atendimento da Urbel ou encaminhados pela Defesa Civil. O número de vistorias registradas somente em janeiro de 2020 foi duas vezes maior que a soma de todas as solicitações de 2019 (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2020).

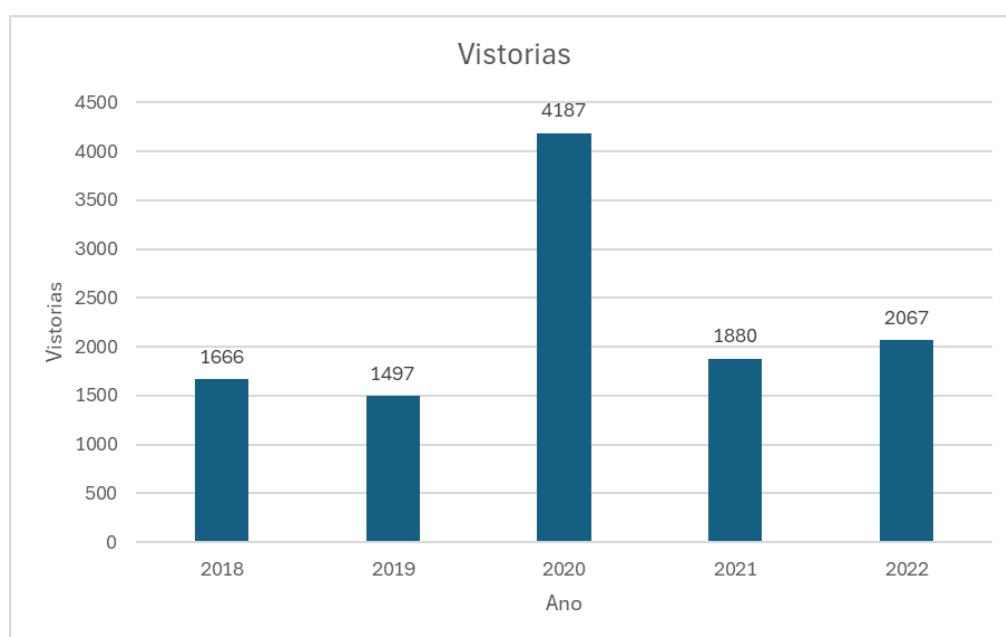


Figura 8- Vistorias realizadas nas moradias em Belo Horizonte

Fonte: DEFESA CIVIL DE BELO HORIZONTE,

2022.

Segundo reportagem do G1 Minas (2020), com as fortes chuvas ocorridas no início de 2020, milhares de famílias ficaram desabrigadas em razão de alagamentos e deslizamentos. Apenas nos dias 24 e 28 de janeiro, dias de maiores ocorrências de chuvas na capital, foram registrados 3.166 desabrigados e desalojados na cidade. Para amenizar os danos às famílias, a Prefeitura encaminhou os atingidos às casas de parentes e amigos e pousadas, em uma parceria feita com a Cáritas, organização humanitária ligada à Igreja Católica. Somente no Jardim Alvorada, onde cinco pessoas morreram (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2020), a Urbel realizou 240 vistorias e confirmou a remoção de 122 famílias. As chuvas também causaram a desestabilização da torre da Cemig e danos às redes de água e esgoto da Copasa. Houve a necessidade ainda de estabilização de encostas e mitigação de áreas de risco.

Em 2022, a Prefeitura de Belo Horizonte informou que as moradias em risco estão localizadas em diversas regiões da capital, principalmente nas áreas informais, vilas e favelas. No período entre janeiro e novembro de 2022, 2.067 moradias passaram por vistorias e 327 famílias foram removidas de locais com risco alto de deslizamento. Destas, 58 remoções são de caráter definitivo e as demais famílias retornarão para as moradias após finalização de obras de manutenção e mitigação de risco geológico.

5.1.2 Uso e Ocupação do Solo

No decorrer dos anos o adensamento populacional em Belo Horizonte foi intensificado, especialmente a partir da década de 1960, com a consolidação industrial da cidade, o que gerou a expansão da mancha urbana a regiões mais ao norte, como as atuais regionais Nordeste, Pampulha e Venda Nova (PENA, 2017). Nesse contexto, destaca-se que os solos sempre foram alvo para aquisição de bens lucrativos, seja por meio da exploração mineral, do uso agrícola ou mesmo para construções civis, sendo que seu uso é realizado, muitas vezes, de maneira pouco racional, podendo causar uma série de degradações ambientais (CRUZ et al., 2019). Ainda segundo Cruz et al., (2019), a retirada da cobertura vegetal, por exemplo, pode originar processos erosivos intensos que, além de alterar substancialmente as paisagens, trazem prejuízos ao ambiente. Por vezes, as próprias características naturais de uma região, como o

clima, a geologia e o relevo, intensificam a ocorrência de processos degradantes, como a erosão, sendo que a retirada da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo acentuam a ocorrência não somente da erosão, como também de movimentos de massa, que, segundo Bigarella (2003) são “os mais importantes processos geomórficos modeladores da superfície terrestre”, sendo os deslizamentos de terra e os escorregamentos os exemplos mais comuns em áreas urbanas.

Belo Horizonte possui características físicas próprias do município que favorecem a ocorrência de riscos geológicos em função de seus condicionantes geomorfológicos e geológicos, podendo ocorrer processos erosivos e movimentos de massa em algumas áreas

específicas (CRUZ et al, 2019). Logo, o zoneamento municipal também deve considerar tais aspectos para restringir o uso do solo nestas regiões, sendo importante estudos que relacionem os locais considerados como áreas de risco com o nível de restrição à ocupação, como forma de analisar a efetividade das políticas públicas.

A Figura 9 apresenta o mapa de Uso e Ocupação do Solo do município de Belo Horizonte. É possível observar que a maior parte do município se encontra urbanizado.

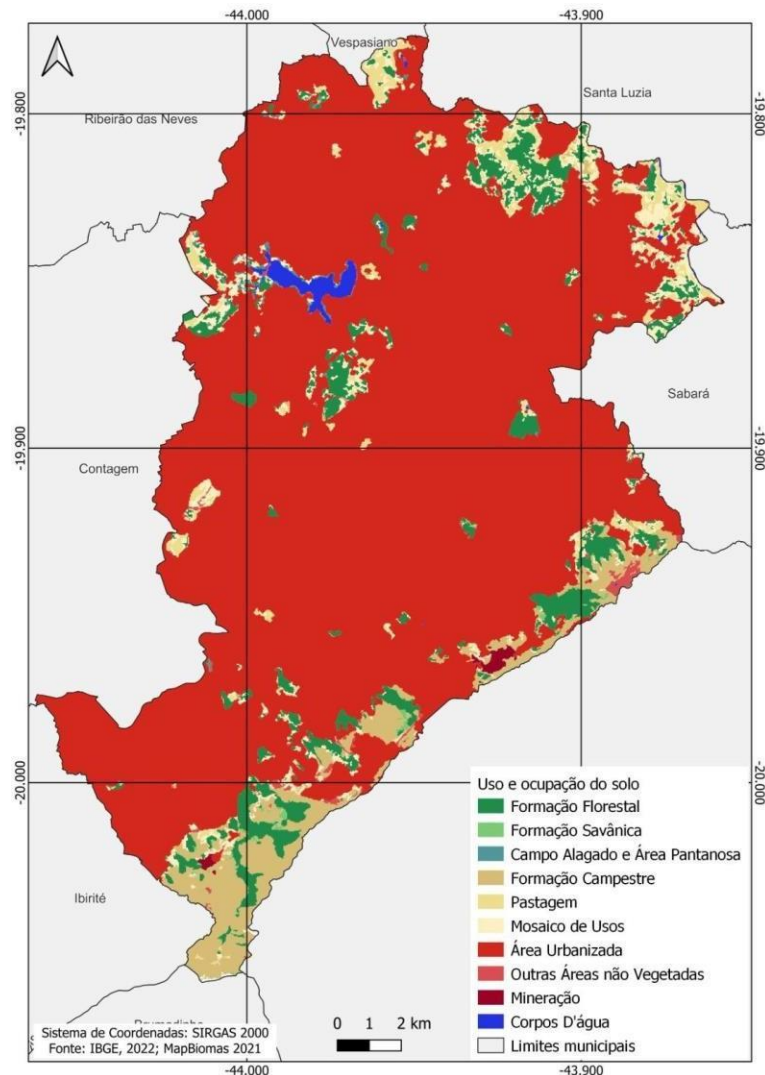


Figura 9- Mapa de uso e ocupação do solo de Belo Horizonte

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

É possível observar no mapa (Figura 9) que Belo Horizonte possui uma pequena porção distribuída de uso do solo em pastagens ao longo do município. A degradação de pastagens tem consequências abrangentes, podendo ocasionar impactos significativos no solo, nos recursos hídricos, na fauna e flora de diversos ecossistemas, uma vez que os efeitos da erosão em pastagens podem afetar a qualidade de vida de comunidades rurais e urbanas. Dentre as formas de uso e ocupação do solo, as pastagens constituem um componente essencial de paisagens em Minas Gerais, ocupando cerca de 65% da área rural. No entanto, há uma problemática nas questões pluviométricas, sendo essas áreas sensíveis à erosão e principalmente deslizamentos de massa (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2002).

5.1.3 Relevo

Para que ocorram deslizamentos, deve haver agentes deflagradores como chuvas intensas e declividade que favoreçam (FILHO, 2012). O município de Belo Horizonte apresenta uma declividade variada, sendo mais predominante o relevo ondulado, espaçados com relevo forte ondulado e relevo escarpado (Figura 10). Segundo a Prefeitura de Belo Horizonte (2020), as regiões com trechos mais suaves são a Área Central e a Pampulha, já as com maior concentração de trechos íngremes são o Aglomerado da Serra, do Taquaril, o Morro das Pedras e o Aglomerado Santa Lúcia.

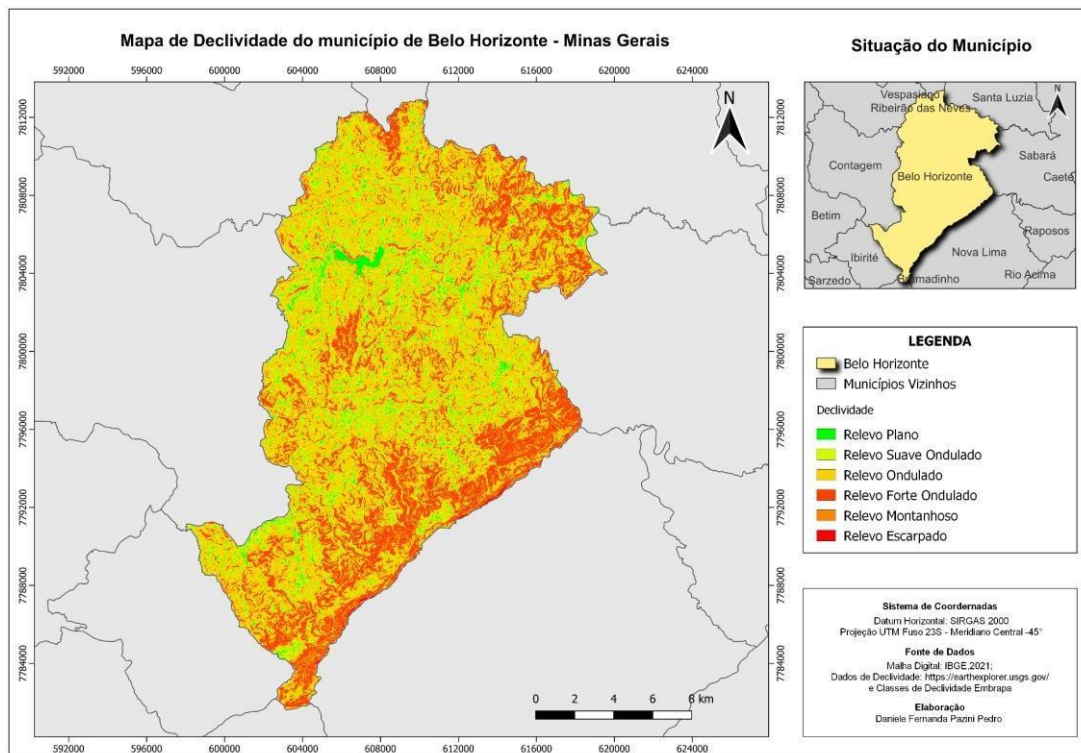


Figura 10- Mapa de Declividade do Município de Belo Horizonte

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

O relevo de Belo Horizonte é caracterizado por colinas e pontuado por morros, associado a rochas do tipo gnaisses e filitos, sobre as quais se desenvolve espessa cobertura de solo e de rochas alteradas quimicamente (alterita, saprolito), típicas de regiões tropicais úmidas, somado a intervenções antrópicas mal conduzidas (cortes ao longo das vertentes, precariedade das edificações etc.) e do intenso impacto pluvial, seguida pela saturação e rompimento dos valores de poro-pressão-neutro-negativa do solo/saprolito, acaba

por favorecer a ocorrência desse tipo de processo (JARDIM, 2012). Além desses aspectos, Parizzi et al. (2004) identificou em bairros de Belo Horizonte ausência de fundações em moradias precárias, construídas sobre material inconsolidado de origem coluvial e de depósitos de vertente (tálus), além de aterro e lixo, em taludes com declividades elevadas ($>30^\circ$), altamente susceptíveis a escorregamentos.

5.1.4 Vulnerabilidade

Tavares et. al, (2012) afirma que a análise de risco compreende o estudo das características físicas da área e o comportamento desse cenário em relação às ocupações antrópicas. A identificação dos processos geodinâmicos são fundamentais para a classificação do risco geológico/geotécnico, bem como a vulnerabilidade da região quanto ao risco de desastres. De acordo com a Figura 11, a vulnerabilidade relacionada ao risco de desastres associados ao movimento de massa em Belo Horizonte é classificada como muito alta na região leste e norte do município. Observando o mapa de declividade (Figura 10), é possível verificar que o relevo nessas regiões é em grande maioria ondulado, forte ondulado e escarpado.

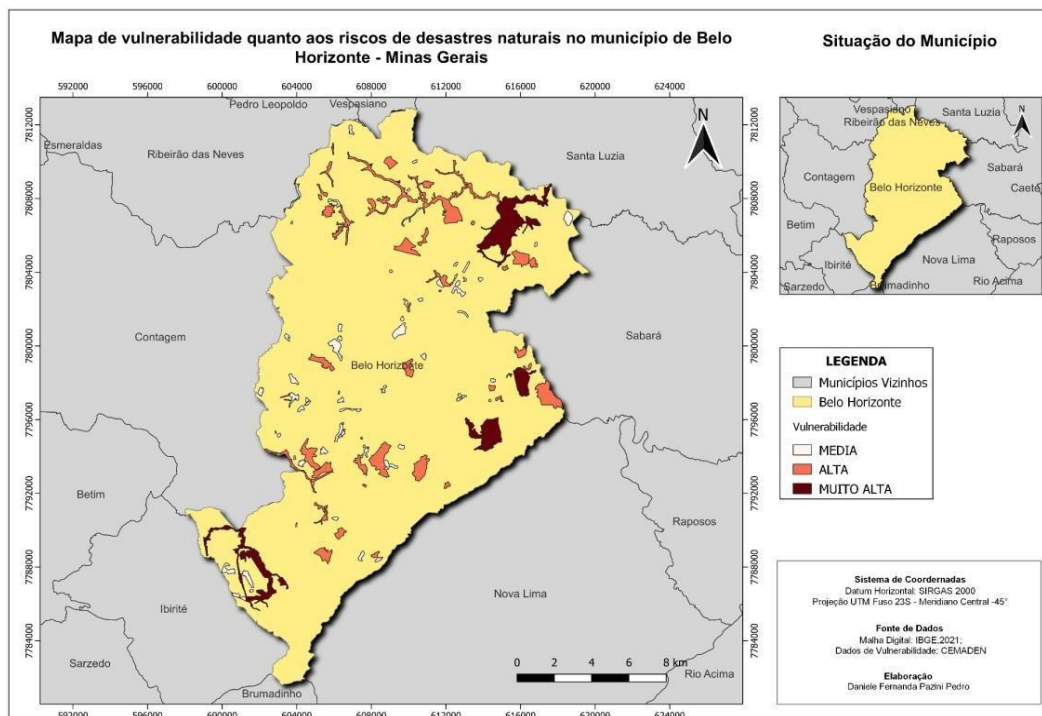


Figura 11- Mapa de vulnerabilidade quanto aos riscos de desastres naturais no município de Belo Horizonte

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

A região Centro-Sul, Leste e Nordeste do município apresentam índice de vulnerabilidade muito alta. As ocorrências de deslizamentos em áreas de risco, especialmente naquelas em que a população é mais vulnerável pode potencializar os impactos, sobretudo humanos. Segundo Rosa Filho & Cortez (2010), os acidentes geológicos associados a deslizamentos no Brasil são destacados em áreas urbanas que apresentam um menor poder aquisitivo, que ocupam preferencialmente as encostas de declividades altas, a partir dos fundos de vales. O adensamento destas ocupações é feito pela retirada da cobertura vegetal e pela execução de cortes impróprios, aumentando o risco de deslizamentos.

De acordo com o Plano de Contingência para Enfrentamento de Desastres em Belo Horizonte (2022), em consequência das características topográficas e suas bacias hidrográficas do município, possui áreas de encostas e baixadas com ocupações vulneráveis a desastres geológicos, cujos riscos potenciais são agravados durante o período chuvoso. A vulnerabilidade aos perigos de deslizamento é também função da localização (topografia, geologia, drenagem), do tipo de atividade presente e da frequência de deslizamentos no passado de determinado local (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008). O mapa de declividade (Figura 10), frente ao mapa de vulnerabilidade (Figura 11) demonstra que a ocorrência de deslizamentos é mais alta em regiões vulneráveis.

As localidades na área considerada “Muito Alta” quanto aos riscos de desastres naturais, incluindo os deslizamentos de acordo com o INOV (2020) e a quantidade de moradores são:

- Marcola, Nossa Senhora de Fatima, Vila Novo São Lucas, Fazendinha, Santana do Cafezal, Nossa Senhora da Conceição, Nossa Senhora Aparecida: 38151 moradores;
- Vila Independência, Vila Ecológica, Vitória da Conquista, Marieta, Vila Pinho, Vale do Jatobá, Castanheira, Barreiro, Corumbiara, Vila Itaipu: 28400 moradores;
- Vera Cruz: 21444 moradores
- Vila da Ária: 315 moradores
- Boa Esperança, Belo Monte, Vila São Gabriel, Novo Aarão Reis, Ribeiro de Abreu, Conjunto Paulo VI, Maria Tereza: 32414 moradores.

Ao total, a quantidade de moradores soma em 120724 pessoas vivendo em área de risco muito alta em Belo Horizonte.

5.2 Avaliação do padrão temporal dos eventos extremos de chuvas no município de Belo

Horizonte

A Figura 12 apresenta os valores máximos anuais obtidos em um único dia de chuva (RX1) e o valor máximo acumulado em 5 dias consecutivos de chuva (RX5) da série histórica da Estação 83587.

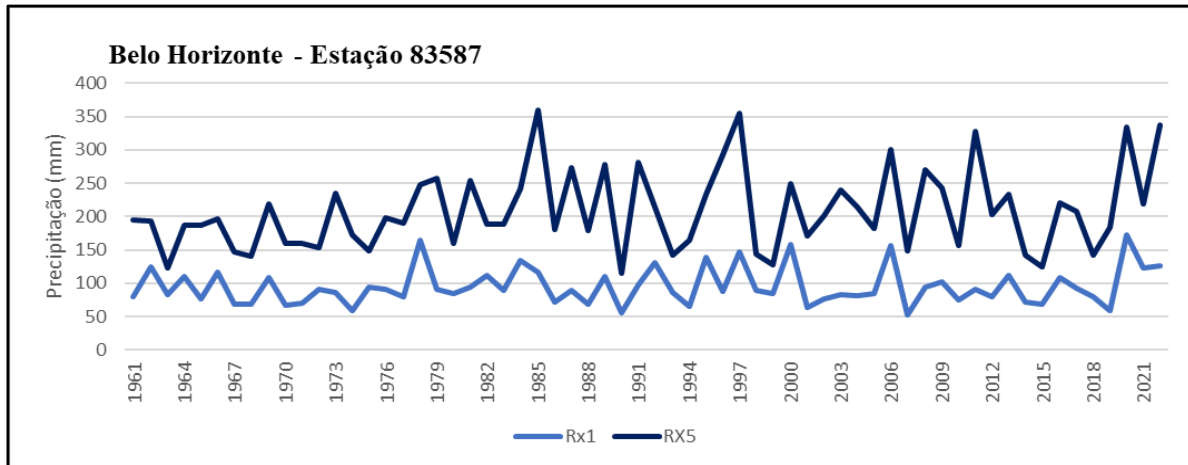


Figura 12- Valores de RX1 e RX5 para a estação pluviométrica Belo Horizonte 83587

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

O índice RX1 indica o máximo de chuva acumulada em único dia de cada ano ao longo da série histórica (1961-2022). Analisando a série histórica de 61 anos, o valor mínimo de chuva acumulada em um único dia do ano foi de 53 mm, no ano de 2007, e o máximo de 171,8 mm, no ano de 2020. Este máximo de chuva acumulada em 24 horas ocorreu no final do mês de janeiro de 2020 e coincide com o período em que vários deslizamentos de encostas ocorreram no município de Belo Horizonte. As maiores ocorrências de deslizamentos foram registradas em 24/01/2020, somando 144, em 25/01/2020 com 165, 13/02/2020 com 194, 14/02/2020 com 130, 15/02/2020 com 188, 16/02/2020 com 190 e 17/02/2020 com 204 ocorrências.

É importante ressaltar que entre os meses de novembro a fevereiro, a Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS se forma, com duração de quatro a dez dias em média, provocando grandes volumes nas regiões afetadas, o que contribui para as ocorrências de deslizamentos de terra (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2023). A ZCAS é um dos principais sistemas meteorológicos causadores de chuvas nas regiões Centro-Oeste e Sudeste entre o fim da primavera e o verão (INMET, 2023). Segundo Pazini Pedro et al., (2020),

a ZCAS possui influência sobre os deslizamentos de massa na região de Belo Horizonte, quando em contato com fatores deflagradores, como a declividade do terreno e o uso e ocupação do solo de forma irregular. De acordo com Informativo Meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia, número 04/2020, no período de 22 a 26 de janeiro de 2020, houve elevada ocorrência de precipitação em vários estados da federação, com maior destaque para Minas Gerais, onde foram registrados volumes superiores a 200 mm nesse período.

Em diversos municípios mineiro, em especial Belo Horizonte, apenas nesses cinco dias, os volumes acumulados ultrapassaram os 300 mm, superando a média histórica do mês de janeiro. O grande destaque, com relação às chuvas, no período entre os dias 24 de janeiro e 02 de fevereiro de 2020 foram os acumulados extremos em Minas Gerais, especialmente na região central do estado que inclui a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Segundo o Informativo Meteorológico número 07/2020, a partir do dia 12 a 16 de fevereiro de 2020, as chuvas persistiram no estado de Minas Gerais, com exceção do extremo norte, com destaque para Belo Horizonte e Região Metropolitana.

Neste mesmo período, de janeiro a fevereiro de 2020, de acordo com a Defesa Civil do município, pelo menos 30 pessoas morreram em decorrência dos eventos, segundo noticiários da Agência Brasil (2020).

O índice RX5 apresentado na Figura 12 indica o número máximo de chuva acumulado em cinco dias ao longo da série histórica (1961-2022). Observando a série histórica, o valor mínimo de chuva acumulado em cinco dias foi de 115,5 mm, no ano de 1990, e o máximo de 337,8 mm, no ano de 2022. O evento máximo ocorreu em janeiro de 2022 e causou estragos em diferentes pontos do município.

Já para a estação Horto, que possui uma série histórica de (1961-2019) equivalente a 58 anos, é possível observar que os valores de RX1 apresentam picos menores em comparação com a Figura 12. Apesar de serem estações com períodos equivalentes, a localização da estação 83587 (Figura 12), encontra-se na Zona Sul de Belo Horizonte (Bairro Santo Agostinho), já a estação Horto, está localizada na Zona Leste (Bairro Horto Florestal, estando a 9,1 km de distância uma da outra. O índice RX1 apresenta o valor mínimo de 37,6 mm no ano de 1961 e valor máximo de 164,2 mm no ano de 1978.

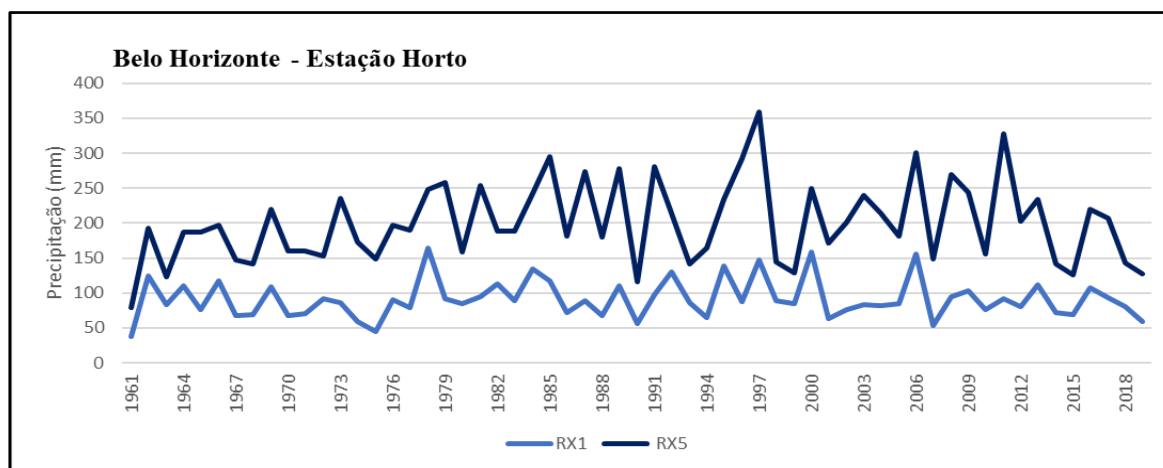


Figura 13- Valores de RX1 e RX5 para a estação pluviométrica Belo Horizonte – Horto

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

No entanto, para os valores de RX5 é possível observar uma semelhança entre as duas estações, apresentando um perfil de mínimo e máximo de chuva acumulado ao longo de 5 dias com picos e quedas semelhantes, apesar da localização distinta e distância das estações. O menor valor de RX5 ocorreu em 1961, registrando 78,4 mm, já o valor máximo em 1997, sendo de 358,3 mm.

É possível observar na Figura 14, que apresenta a acumulado médio mensal de precipitação entre 1961 a 2022 na Estação 83587, que os meses com maiores volumes de precipitação são os meses de novembro, equivalente 243,33 mm, dezembro com 362,14mm e janeiro com 341,05 mm.

Já para a Estação Horto, é possível observar que o padrão temporal mantém a mesma dinâmica, sendo novembro (238,72mm), dezembro (333,01mm) e janeiro (299,41mm), os meses com maiores acumulados de precipitação:

a)

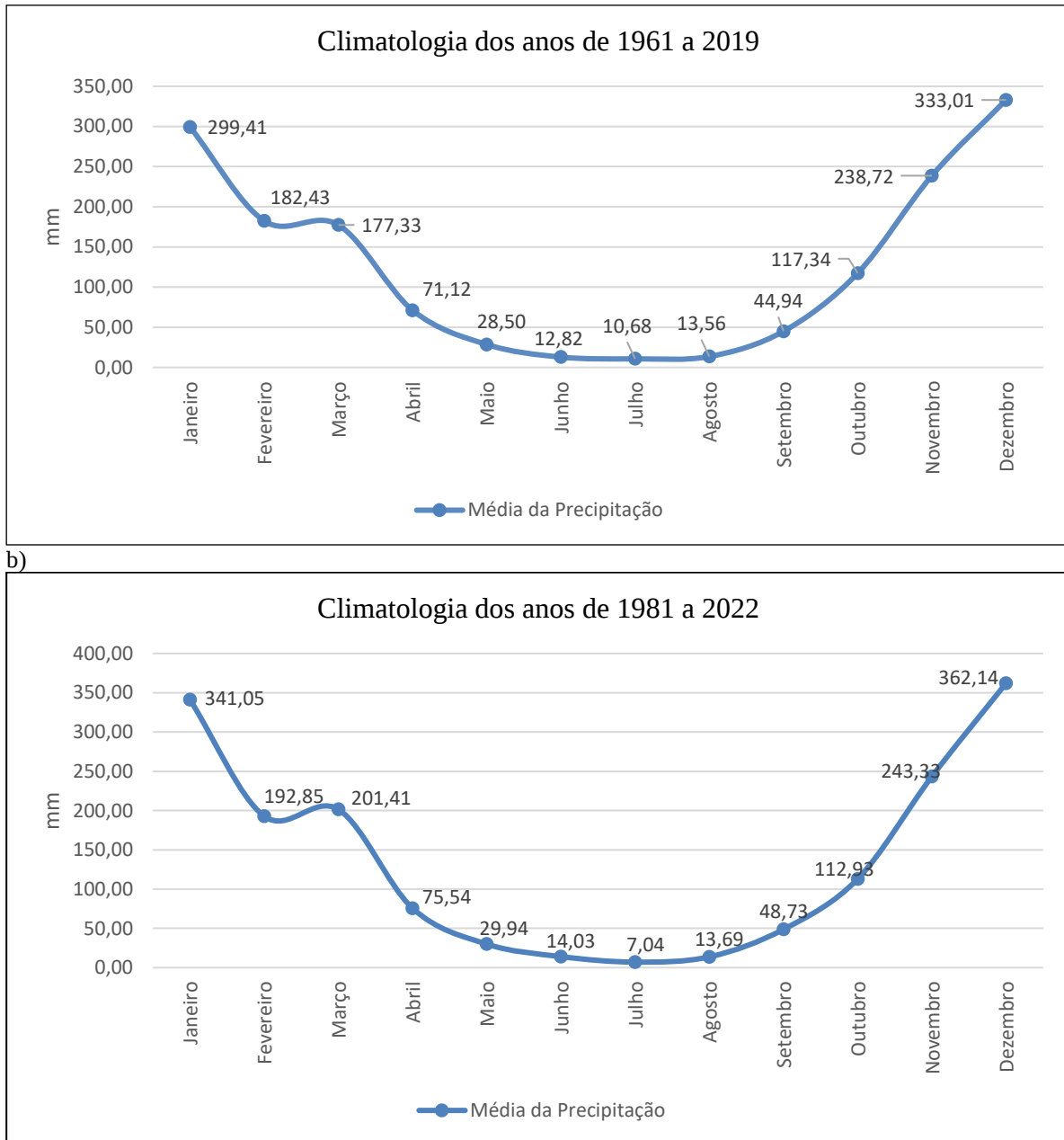


Figura 14- Acumulado médio mensal de precipitação entre os anos de 1961 a 2019 para da Estação a) Horto e b) entre os anos de 1981 a 2022 da Estação 83587

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

A Figura 15 mostra que, ao considerar os anos de 2009 e 2022, o mês de fevereiro apresentou o maior número de registros de deslizamentos, sendo mínimo 5, quartil 75% (Q3) de 48,25, e máximo 204. Vale ressaltar que, apesar de não ser o mês com o maior acumulado médio mensal de chuvas, conforme evidenciado nas Figura 16, fevereiro marca o início do término da estação chuvosa. Dessa forma, o acúmulo de chuvas nos meses anteriores (dezembro

e janeiro), a depender do total acumulado, pode contribuir para o aumento de deslizamentos neste mês, devido ao consequente encharcamento do solo.

As Figuras 16 mostra que em termos de anomalias de chuvas, o ano mais chuvoso da Estação Horto foi o ano de 2004, chegando a uma máxima de aproximadamente 500 mm de chuva. Para a Estação 83587, o ano de 2021 ultrapassou 600 mm, representando um ano com eventos de chuvas extremas.

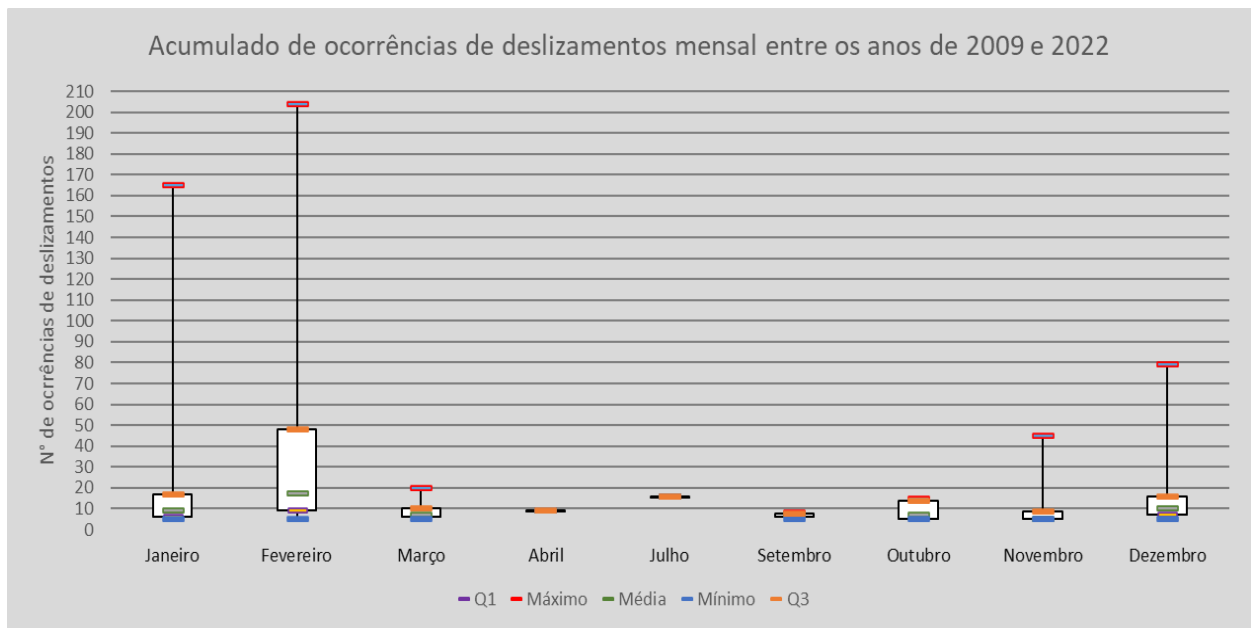
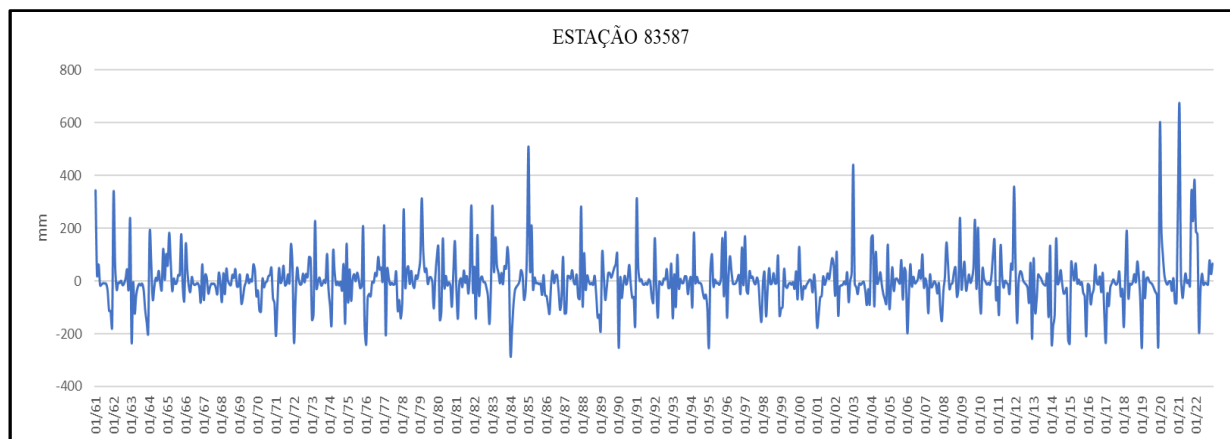


Figura 15- Acumulado de ocorrências de deslizamentos mensal entre os anos de 2009 a 2022

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

a)



b)

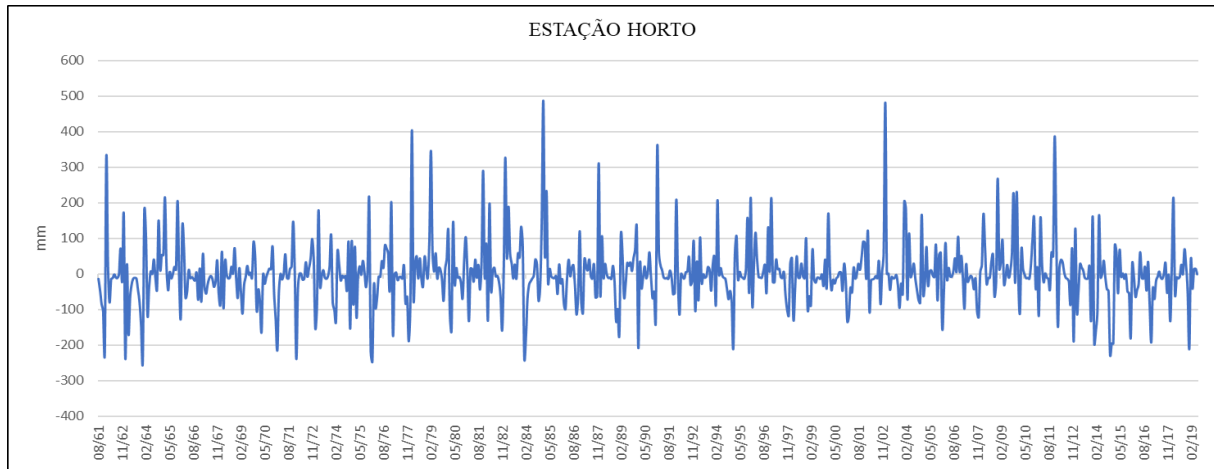


Figura 16- a) Anomalia pluviométrica dos anos de 1961 a 2022 da Estação 83587. b) Anomalia pluviométrica dos anos de 1961 a 2019 da Estação Horto

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

5.3 Avaliação do padrão espacial das ocorrências dos eventos de deslizamentos no município de Belo Horizonte

A Figura 17 apresenta a localização das ocorrências de deslizamentos no município de Belo Horizonte, entre os anos de 2009 a 2022, ano que iniciou a base de dados de deslizamentos em Belo Horizonte. É possível observar que as regiões com vulnerabilidade alta e muito alta, como apresentado na Figura 11, coincidem com as áreas de maiores ocorrências de deslizamentos.

De acordo com Moreira e Barbieri (2020), dentre as regionais, Barreiro, Noroeste, Leste, Oeste e Centro-Sul, acumulam a maior parte dos setores censitários classificados como área de risco e cerca de 50% dos domicílios removidos pela prefeitura da cidade entre 2010 e 2019.

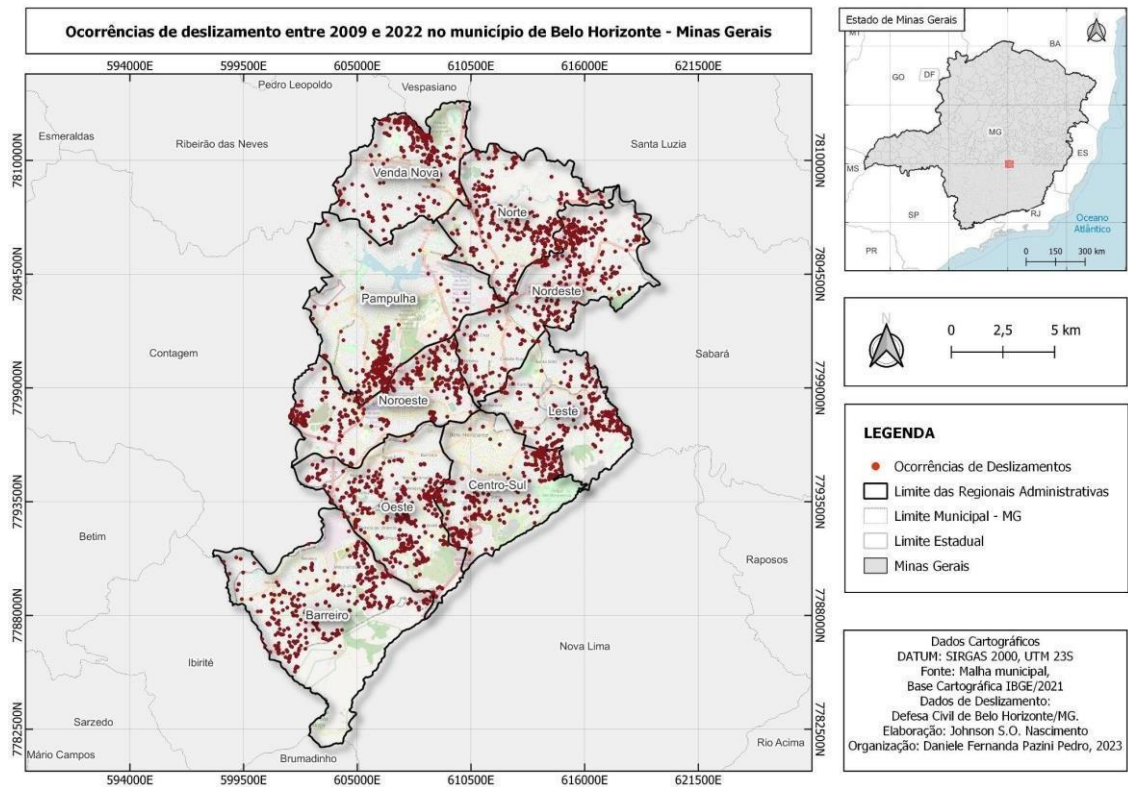
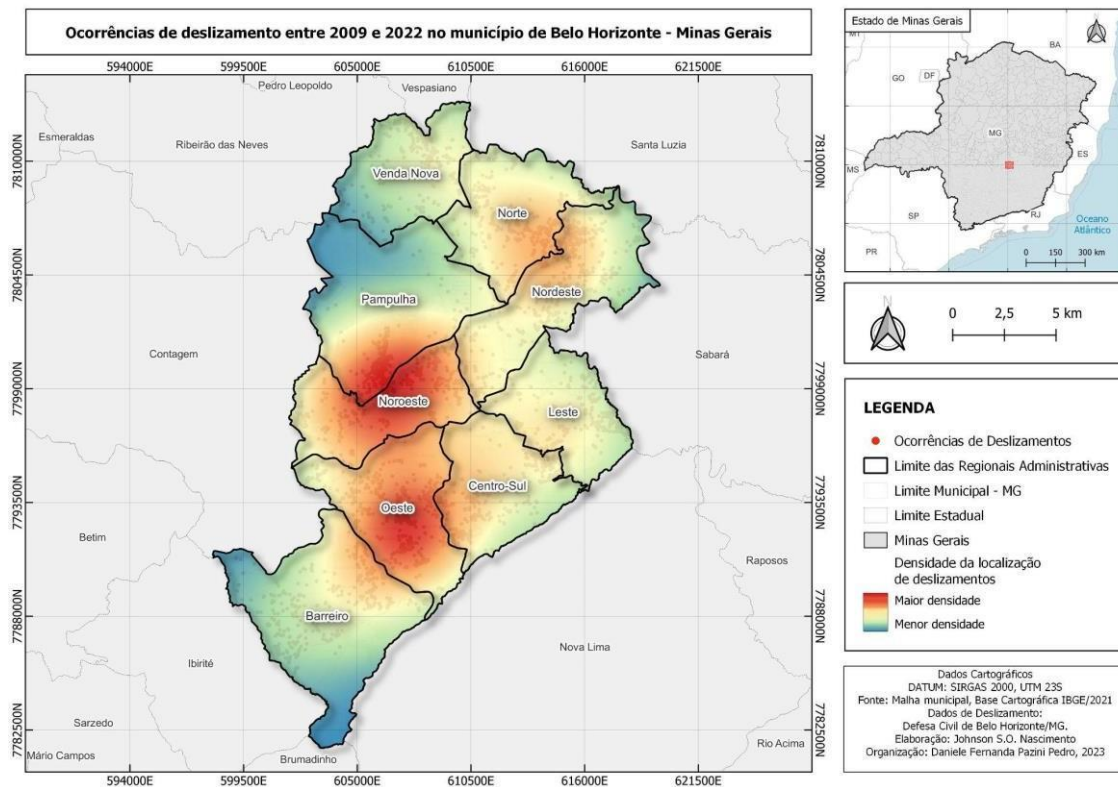


Figura 17- Ocorrências de deslizamentos entre 2009 e 2022 no município de Belo Horizonte

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

O mapa de Kernel (Figura 18) mostra que as regiões Noroeste e Oeste apresentam uma densidade maior de ocorrências, quando comparado com outras regiões. A região sul da Pampulha também possui uma densidade considerável de ocorrências.



b)

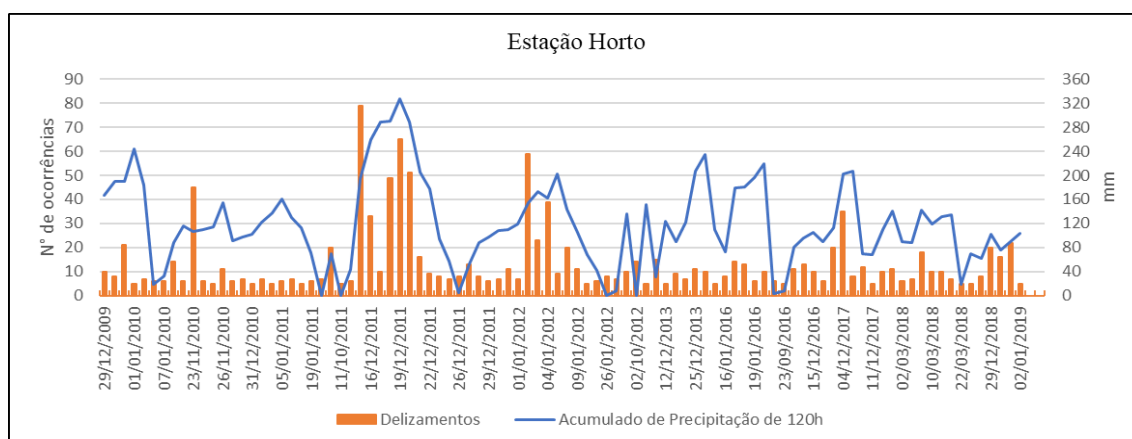


Figura 19- a) Ocorrências de deslizamentos por data e precipitação acumulada para 120h da Estação 83587. b) Ocorrências de deslizamentos por data e precipitação acumulada para 120h da Estação Horto

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

Em relação a Estação Horto, os maiores números de deslizamentos correspondem ao período com os maiores acumulados de chuvas, o que ocorre principalmente no mês de dezembro. chegando há um acumulado de precipitação de aproximadamente 270 mm em 5 dias, com o número de ocorrências excedendo a 80 em dezembro de 2011.

A literatura mostra que a maior influência na ocorrência de deslizamentos está relacionada às altas intensidades de precipitação, independentemente de a precipitação anual estar próxima ou não da média esperada (Huang et al., 2015), portanto, independente da intensidade e duração da chuva, certamente há uma relação entre a ocorrência de deslizamentos e os eventos de chuva.

Os dados analisados demonstram a correlação entre chuvas intensas e deslizamentos. Belo Horizonte, durante períodos chuvosos representa valores altos de precipitação, principalmente entre os meses de novembro a janeiro, registrando máximos de chuva em um único dia catastróficos, como é o caso dos deslizamentos ocorridos em janeiro de 2020. Nota-se que Belo Horizonte é um município de grande urbanização e as áreas de risco analisadas inserem-se no contexto de área urbana. Movimentos de massa ocorrem tanto em áreas de alto padrão construtivo quanto em áreas de baixo padrão construtivo, o que reforça a importância dos condicionantes físicos no desencadeamento dos deslizamentos. Todavia, nas áreas de vilas e favelas o risco é agravado pela conjugação dos aspectos físicos e de uso da terra e principalmente pela atuação das chuvas.

5.4 Análise da relação entre intensidade de chuva e ocorrências de os deslizamentos

A fim de verificar a relação entre a precipitação acumulada e o número de ocorrências de deslizamentos de terra foram calculados os índices Rx1 e Rx5 e os valores de diferentes percentis de chuvas, conforme discutido anteriormente.

Mediante as cinco classes de precipitação utilizadas, como apresentadas previamente, foi realizada a análise dos percentis para a obtenção de acumulados de chuva que corresponderam aos maiores eventos de deslizamentos para cada uma das estações do estudo.

A Figura 20 apresenta os valores de percentis de precipitação para a Estação Horto. O percentil 95 (99) indica que 95% (99%) das observações estão abaixo desse valor e apenas 5% (1%) estão acima, o que indica um evento de chuva intensa (muito intensa).



Figura 20- Percentis de precipitação de acumulados de 24h e 120h da Estação Horto considerando os anos 1961 a 2019

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

A Tabela 5 apresenta os eventos com 5 ocorrências ou mais para o período avaliado. É possível observar que apenas o evento de janeiro de 2013 apresentou o limiar de precipitação classificado como Muito Intensa ($\geq$ percentil 99) para 24 horas. Tal resultado vai ao encontro do Relatório do CPTEC (2013) o mês de janeiro de 2013, em que destaca que a formação de três episódios de ZCAS favoreceram os acumulados de chuva principalmente no norte de São Paulo e em Minas Gerais, com registros diários superiores a 70 mm em várias localidades. No período de 15 a 18 de dezembro de 2011, foram totalizados 161 registros de deslizamentos. De acordo com o Boletim do Infoclima, disponibilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), a atuação de episódios de ZCAS e a formação de vórtices ciclônicos nos altos níveis da atmosfera contribuíram para um padrão de chuvas acima do normal climatológica no Brasil. Dentre os episódios de ZCAS que se configuraram em dezembro de 2011, destacou-se o que ocorreu no período de 15 a 21, responsável pelos maiores acumulados de chuva no leste de Minas Gerais. Na estação 83587, o acumulado no mês de janeiro foi de 317 mm. Ressalta-se que a estação de Horto contempla dados até 2019 e por essa razão não foi utilizada para a análise dos eventos ocorridos entre 2020 e 2022.

Tabela 5- Número de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e correspondente classe de chuva para Estação Horto

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Horto	18/12/2011	49	86,3	Moderadamente Intensa
	15/12/2011	79	91,4	Intensa
	16/12/2011	33	83,3	Moderada
	21/01/2013	5	111,4	Muito Intensa

25/12/2013	11	84,3	Moderada
17/01/2016	14	108,1	Intensa
04/12/2017	35	93,2	Intensa
02/03/2018	6	80,2	Moderada

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

Os eventos com mais de 5 ocorrências, bem como os respectivos acumulados de chuvas em 120h são apresentados na Tabela 6. De acordo com os dados, o evento de 19 de dezembro de 2011 foi aquele que correspondeu ao maior número de ocorrências de deslizamentos. No mês de dezembro o acumulado de chuva registrado na Estação 83857 foi 495mm, o que correspondeu a uma anomalia positiva de 132 mm (45% acima da média).

De acordo com o CPTEC (2013), a ocorrência de chuvas em dezembro de 2013, não se deu em razão da ocorrência de uma ZCAS. No entanto, o acumulado de chuvas na região excedeu a média esperada, segundo a Prefeitura de Belo Horizonte (2013), o que gerou chamadas de emergência na Defesa Civil devido à ocorrência de deslizamentos.

Considerando o acumulado de 120h, o evento classificado como muito intenso (chuva acumulada de 327,6) ocorreu em dezembro de 2011. Neste mês, o acumulado mensal de chuva foi de 720 mm (357 mm acima da média), sendo o 4º mês de dezembro mais chuvoso do período analisado. O mês de dezembro mais chuvoso ocorreu em dezembro de 2020 (934 mm).

Tabela 6-Total de ocorrências de deslizamentos acumulados em 5 dias, acumulados de chuva em 120h e classe de chuva para Estação Horto.

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
	01/01/2010	5	243,5	Moderadamente Intensa

Horto	17/12/2011	10	288,9	Intensa
	19/12/2011	65	327,6	Muito Intensa
	20/12/2011	51	288,6	Intensa
	18/12/2011	49	290,1	Intensa
	26/12/2013	10	233,9	Moderadamente Intensa
	25/12/2013	11	206,3	Moderadamente Intensa
	20/01/2016	10	219,8	Moderadamente Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

É possível observar que entre os dias 16 a 20 de dezembro de 2011 os eventos de chuvas foram classificados por intensa e muito intensa. Como já discutido anteriormente, a atuação de vários episódios de ZCAS foi o principal mecanismo responsável pela ocorrência de chuva acima da normal climatológica em grande parte de Minas Gerais, em especial em Belo Horizonte, registrando médias pluviométricas acima do esperado.

De acordo com o G1 Minas (2011), Belo Horizonte registrou no período mais de 200 notificações de deslizamentos de terra e inundações, sendo este dado representado nas tabelas 3 e 4. Na Zona Oeste da capital, por exemplo, um prédio ficou ameaçado por uma cratera que se abriu na rua. Os moradores foram orientados a deixar os imóveis próximos ao muro por risco de desabamento. Das mais de 200 chamadas na Defesa Civil, 61 foram originadas por deslizamentos das Regiões Norte e Nordeste da capital.

A Figura 21 apresenta os Percentis de precipitação calculados por meio da Estação 83587, estação essa cujos dados se estendem até 2022.



Figura 21- Percentis precipitação para acumulados de 24h e 120h da Estação 83587

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

A Tabela 7 apresenta o total de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e classe de chuva.

Tabela 7- Total de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e classe de chuva para a estação 83587

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
83587	21/01/2013	5	111,4	Intensa
	17/01/2016	14	108,1	Intensa
	04/12/2017	35	93,2	Intensa
	29/01/2020	65	117,4	Intensa
	08/02/2021	6	122,4	Intensa
	09/01/2022	32	126,8	Intensa
	24/01/2020	144	171,8	Muito intensa
	25/01/2020	165	140,7	Muito Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

De acordo com as ocorrências de deslizamentos e os percentis e acumulados de precipitação de 24h para classe intensa, pode-se observar que 3 datas obtiveram ocorrências de deslizamentos muito altas, sendo estas em 04/12/2017 (35), 29/01/2020 (65) , 09/01/2022 (32) 24/01/2020 (144) e 25/01/2020 (165). A Tabela 7 mostra dois eventos em janeiro de 2020 em que a chuva acumulada em 24h foi superior ao percentil 99 (133,194 mm) e assim classificados como um evento muito intenso.

De acordo com os dados da Estação 83857, é possível observar que a chuva acumulada em 24h, quando ultrapassa percentil de 95, a tendência de ocorrência de deslizamentos aumenta, comprovando que acumulados de chuva acima de percentis 95 (intensa) podem desencadear deslizamentos em Belo Horizonte.

No dia 04/12/2017, de acordo com o Boletim de Previsão de Risco Geo-hidrológico do CEMADEN (2017), a chuva ocorrida incrementou os acumulados pluviométricos, condição que favoreceu os eventos de movimentos de massa. O Boletim destacou ainda neste período o risco MÉDIO a ALTO de ocorrência de eventos de movimentos de massa, inundações e enxurradas em Belo Horizonte e Região Metropolitana.

No dia 29/01/2020, Belo Horizonte registrou 65 eventos de deslizamentos e de acordo com o Boletim de Previsão de Risco Geo-hidrológico do CEMADEN (2020), a previsão meteorológica indicou condições para a continuidade da chuva para o Sudeste do Brasil. Considerando principalmente os altos acumulados observados na semana do dia 20/12 em Minas Gerais, houve potencial para a deflagração de processos geo-hidrológicos que causaram impactos significativos. Neste Boletim o Centro alertou para risco ALTO para a possibilidade de eventos geo-hidrológicos em Belo Horizonte.

No evento mais recente de janeiro de 2022, com acumulados de 126,8 mm (classe intensa), correspondeu a 32 eventos de deslizamentos, estes ocorridos em 09/01/2022. De acordo com os dados da Estação 83857, o acumulado de chuva no mês de janeiro foi de 528 mm (anomalia positiva de 187 mm).

Os acumulados de ocorrências bem como os totais de chuva acumulado em 120 e as classes de chuva são apresentados na Tabela 8. Em conformidade com a Tabela 6, é possível analisar que a maioria das ocorrências de deslizamentos foram no ano de 2020, 3 dias seguidos totalizando 171 deslizamentos. Essas datas são próximas da ocorrência de deslizamento analisado com chuva acumulada em 24h, do dia 29/01/2020, com registro no dia de 65 eventos e com chv24h de 117,4mm. Comparando a Tabela 6 com a Tabela 5 (limiares de 24h), é possível considerar que não é necessário um acumulado de precipitação de 5 dias para que ocorra o deslizamento. Muitas vezes, uma única chuva com índice pluviométrico alto é suficiente para desencadear deslizamentos, principalmente em áreas que já são suscetíveis a esses eventos. A semana do dia 24 ao dia 29/12/2020, foi marcada pela ocorrência da ZCAS, atuando principalmente sobre o Sudeste do Brasil (INMET,2020). Foram observados episódios de chuvas intensas em Belo Horizonte, sendo classificado como de ALTO risco geo-hidrológicos (CEMADEN, 2020).

Tabela 8- Total de ocorrências de deslizamentos em cinco dias, acumulados de chuva e classe de chuva para 120h da Estação 83587

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
83587	19/12/2011	65	327,6	Intensa
	26/01/2020	39	323,1	Intensa
	27/01/2020	60	323,1	Intensa
	28/01/2020	72	319,9	Intensa
	10/01/2022	22	314,2	Intensa
	12/01/2022	11	309,6	Intensa
	25/01/2020	165	333,4	Muito Intensa
	11/01/2022	13	337,8	Muito Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

Não muito diferente da classe “Intensa”, a “Muito Intensa” corresponde à alta ocorrência de deslizamentos em janeiro de 2020 (165), mês de atuação da ZCAS e de altas precipitações em Minas Gerais. É possível observar que o acumulado de precipitação em 120h (333,4 mm) registrado no dia 25/01/2020 foi superior ao percentil 99.

O mês de janeiro de 2022 também foi marcado por um mês com precipitação acumulada superior à média climatológica (187 mm acima da média). Ressalta-se que neste mês dois eventos de chuvas foram caracterizados por intenso e um muito intenso. Ainda assim, o total de ocorrências foi inferior àquele observado em 2020.

As mesmas análises de extremos de chuva e ocorrência também foram realizadas para a Estação de Buritis (Figura 22).

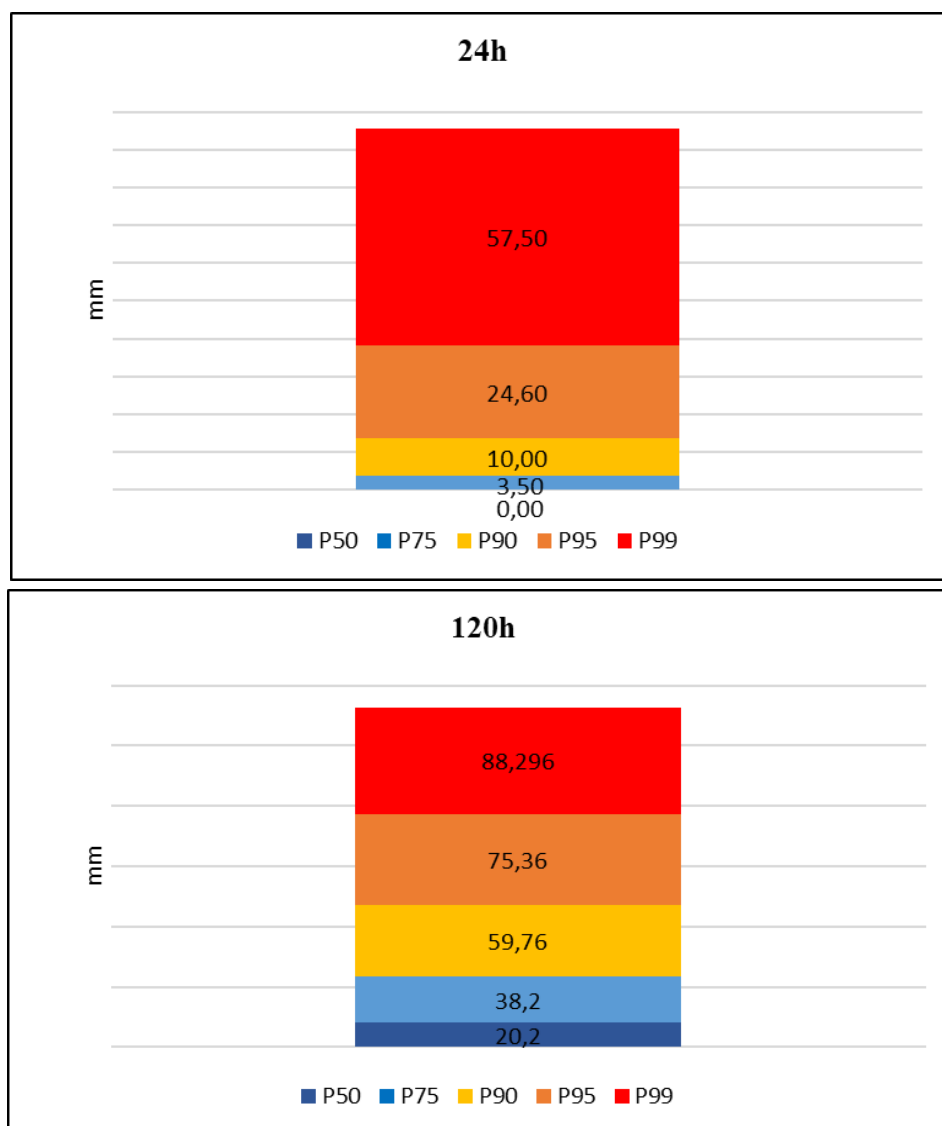


Figura 22- Percentis de 24h e 120h para a Estação Buritis

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

A Tabela 9 apresenta o número de ocorrências e respectivos acumulados de chuvas para a Estação Buritis. Destaca-se que o evento com maior ocorrência foi registrado em dezembro de 2011, correspondendo a classe de chuva Intensa (maior que P95 e menor que P99). Ao passo que o evento caracterizado por chuva muito intensa (dezembro de 2010), levou à um total de 6 ocorrências. No mês de janeiro de 2010, de acordo com o Boletim do Infoclima do CPTEC (2010), houve atuação da ZCAS, o que possibilitou chuvas intensas em Belo Horizonte e Região Metropolitana, registrando chuvas diárias acima da média mensal.

Tabela 9- Número de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e correspondente à classe de chuva para Estação Buritis

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Buritis	06/12/2010	6	34,2	Intensa
	15/12/2011	79	31,6	Intensa
	19/01/2016	6	27	Intensa
	20/01/2016	10	30,6	Intensa
	29/12/2018	20	33,6	Intensa
	31/12/2018	22	29	Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

É importante destacar, que a Estação Buritis possui 20,147% de erro, que configura ausência de medições.

Em 2011 por exemplo, de acordo com o Infoclima do CPTEC (2011), a atuação de episódios de ZCAS e a formação de vórtices ciclônicos nos altos níveis da atmosfera contribuíram para um padrão de chuvas acima da normal climatológica na região Sudeste, em especial em Minas Gerais. No entanto, a medição da estação Buritis, apresentou a medição da precipitação com valores baixos quando comparado a outras estações. Há probabilidades de que a estação Buritis esteja sotavento, o que demonstra valores mais baixos na medição. O mesmo ocorre para os anos de 2010, 2016 e 2018, onde os meses de medição foram os de atuação da ZCAS. Para a Estação Buritis, é possível observar ainda que o percentil 99 (Muito Intensa) para acumulado de chuva em 24h foi muito baixo comparado com as outras estações (57, 5mm).

Os eventos considerando o acumulado de precipitação em 120h e suas respectivas ocorrências são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10- Total de ocorrências de deslizamentos em cinco dias, acumulados de chuva e classe de chuva para 120h para a Estação Buritis

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Buritis	07/01/2010	6	88	Intensa
	06/12/2010	6	79,2	Intensa
	19/01/2011	6	84,4	Intensa
	20/01/2016	10	85,8	Intensa
	17/01/2011	9	95,4	Muito Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

Como descrito anteriormente, a Estação Buritis possui uma porcentagem considerável de falhas, como por exemplo, ausência de dados. Mediante número de deslizamentos demonstrados na Tabela 10 e os meses de ocorrência, de acordo com o INMET (2010; 2011; 2016), houve a atuação da ZCAS ocasionando chuvas acima da média nos meses de dezembro e janeiro. Os acumulados demonstrados na Tabela 10 revelam acumulado mais baixos de precipitação, mesmo sendo acumulado de 5 dias antecedentes ao evento.

O mesmo ocorre para a classe Muito Intensa, ocorrência de deslizamento, em um mês/ano de atuação da ZCAS, mas com acumulado de precipitação muito abaixo quando comparado com as demais estações avaliadas.

Considerando os dados da estação Pampulha, os valores para os Percentis de chuva foram superiores àqueles observados para a estação Buritis, com P99 de 133 mm para acumulados de 24h e 355 mm para acumulados de 120 h.

Para a Estação Pampulha, obteve-se os seguintes resultados de percentis:



Figura 23- Percentis de 24h e 120h para a Estação Pampulha

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

Os eventos de chuvas, bem como as ocorrências de deslizamento são apresentados na Tabela 11 para acumulados de 24h.

Tabela 11- Número de ocorrências de deslizamentos, acumulados de chuva em 24h e correspondente à classe de chuva para Estação Pampulha

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Pampulha	23/11/2010	45	147,4	Muito Intensa
	15/12/2011	79	116,8	Intensa
	18/12/2011	49	109	Intensa
	12/12/2013	5	115,4	Intensa
	24/01/2020	144	159,4	Muito Intensa
	25/01/2020	165	116,6	Intensa
	08/02/2021	6	114,6	Intensa
	09/01/2022	32	121,2	Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024

Durante o ano de 2011, ocorreram diversas chamadas à defesa civil de ocorrências de deslizamentos (G1 MINAS, 2011). Como demonstrada nas outras Estações, a semana do dia 15/12/2011 a 19/12/2011 apresentou volumes altos de precipitação, com risco de deslizamentos por toda a capital Mineira, principalmente na região Nordeste. Não muito diferente aconteceu no ano de 2020, com a atuação da ZCAS. É notável que percentis de 24h de classe “Intensa” e com limiares acima de 95 mm desencadeiam muito mais deslizamentos do que os de classe “Muito Intensa”, que por vezes aparecem em apenas duas datas e com limiares não muito acima de 150mm.

Em 2010, de acordo com o Boletim Infoclima do CPTEC (2010), novembro foi marcado pela ocorrência de precipitações acima da média histórica em boa parte das Regiões Sudeste. De acordo com os dados da Estação Pampulha, o acumulado no mês de novembro foi de 186,8 em 24h. Nesse período, houve a formação de regiões de convergência de umidade sobre o Sudeste, sem, contudo, caracterizar episódios bem configurados de Zona de Convergência do Atlântico Sul, no entanto, com destaque para altos acumulados de chuva em Minas Gerais. A alta precipitação ocasionou, de acordo com sites de notícias da Região, situações alarmantes de deslizamentos na região Oeste e Nordeste de Belo Horizonte.

Em 2020, como descrito para as outras estações, a semana do dia 24 de janeiro foi composta por altos índices pluviométricos e deslizamentos em quase toda região da Capital, em destaque também para a região Nordeste.

Considerando os acumulados de 120h para a estação Pampulha, nota-se que os valores de P95 e P99 são próximos daqueles encontrados para a Estação 83857. O evento com o maior número de ocorrências, 25 de janeiro de 2020, para a Estação da Pampulha, correspondeu à classe de chuva Intensa (entre P95 e P99). No entanto, entre os dias 25 a 27 de janeiro, os eventos corresponderam a 264 ocorrências de deslizamento. Nesse período a classe de chuva se mostrou em maioria Intensa, o que foi similar ao encontrado nas análises para as demais estações.

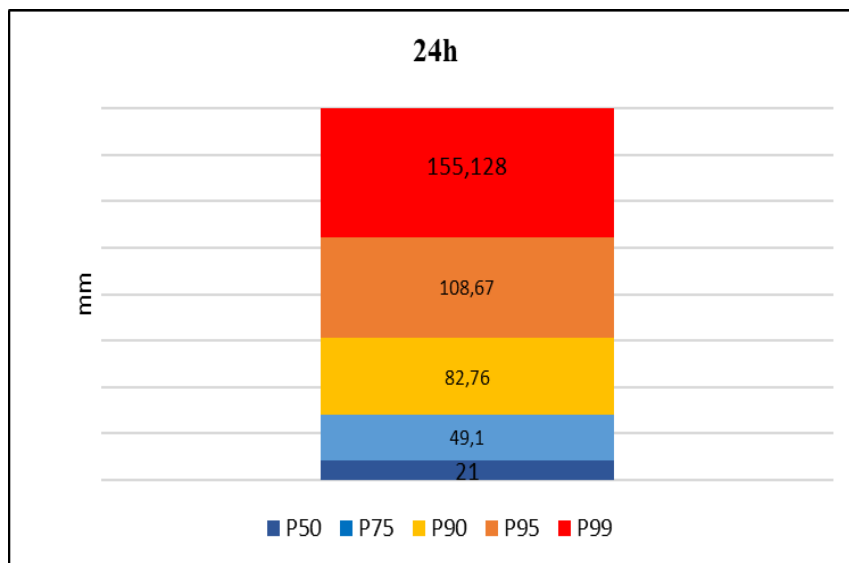
Tabela 12- Total de ocorrências de deslizamentos em cinco dias, acumulados de chuva e classe de chuva para 120h da Estação Pampulha

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Pampulha	01/01/2010	5	278,8	Intensa
	18/12/2011	49	377,2	Muito Intensa
	19/12/2011	65	389,2	Muito Intensa
	20/12/2011	51	337	Intensa
	25/01/2020	165	311,2	Intensa
	26/01/2020	39	301,2	Intensa
	27/01/2020	60	297,2	Intensa
	11/01/2022	13	281,6	Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

A situação se repete para o percentil de classe “Muito Intensa” (Tabela 12), já que os acumuladores foram superiores a 300 mm, indicando que a semana prevaleceu com chuvas, ocasionando, portanto, deslizamentos.

Por fim, a estação Cercadinho apresentou os maiores limiares para os diferentes percentis, quando comparados com as demais estações. O Percentil 95 corresponde a um valor de 108,6 mm para 24h e de 332 mm para 120h.



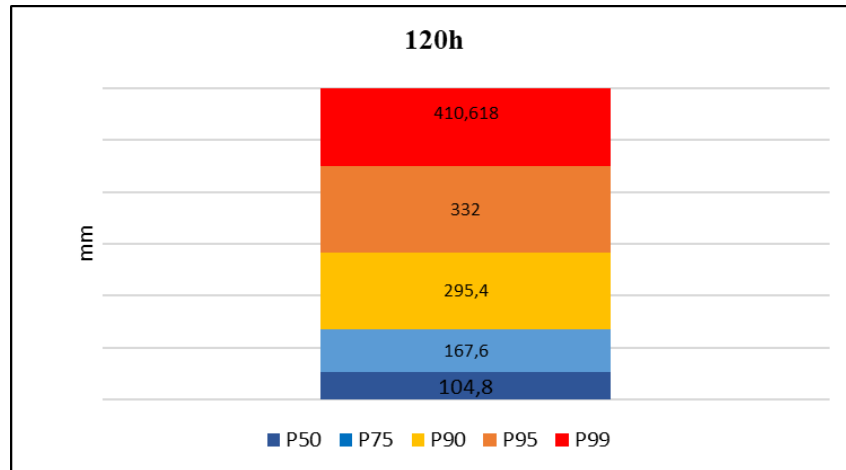


Figura 24-Percentis de 24h e 120h para a Estação Cercadinho

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

As datas de percentis com limiares de 24h intensa e suas respectivas quantidades de deslizamentos são apresentados na Tabela 13. Considerando os limiares para acumulados de 24h, observa-se que entre os dias 24 a 29 de janeiro um total de 451,6 mm e 374 de ocorrências foram registradas no município de Belo Horizonte. Nesse período, o 1º evento foi classificado como Muito Intenso (acumulado de chuva maior do que o P99), seguido por 3 dias com eventos classificados como intensos (acumulado de chuva maior do que o P95).

Tabela 13- Datas e número de ocorrências de deslizamentos dos limiares de precipitação de classe Intensa para 24h da Estação Cercadinho

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Cercadinho	24/01/2020	144	172,6	Muito Intensa
	25/01/2020	165	125,6	Intensa
	29/01/2020	65	153,4	Intensa
	08/02/2021	6	109	Intensa
	09/01/2022	32	144,6	Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

Para os acumulados de 120h, observa-se que o Percentil 99 corresponde a um acumulado de chuva de 410,6 mm (Tabela 14) para a estação Cercadinho.

Tabela 14- Datas e número de ocorrências de deslizamentos dos limiares de precipitação de classe Intensa e Muito Intensa para 120h da Estação Cercadinho

Estação Pluviométrica	Datas	Ocorrências de deslizamentos	Acumulados de chuva	Classes de chuva
Cercadinho	25/01/2020	165	344,6	Intensa
	10/01/2022	22	386,4	Intensa
	12/01/2022	11	408,8	Intensa
	13/01/2022	11	334,2	Intensa
	11/01/2022	13	429	Muito Intensa

Fonte: Autora deste trabalho, 2024.

As datas de maiores ocorrências de deslizamentos continuam as mesmas, como discutido nas outras estações, sendo 2020 e 2022 anos marcados pela alta pluviosidade.

6 DISCUSSÕES

Conforme demonstrado no decorrer do presente trabalho, pode-se verificar que existe uma relação entre o número de ocorrências de deslizamentos de terra e os diferentes períodos de chuva acumulada. Esta relação fica mais evidente quando os acumulados de chuva são maiores, indicando que, à medida que os acumulados de chuva aumentam, os registros de ocorrências também aumentam, mesmo considerando acumulados de chuva em 5 dias. No entanto, podemos ver a existência de grande número de ocorrências com pequena precipitação diária e poucas ocorrências com elevada precipitação diária, sugerindo que a intensidade da chuva não é o único fator determinante para os deslizamentos de terra. Para o acumulado de 5 dias, observa-se o registro de várias ocorrências com acumulados de chuvas menores que 100 mm, o que indica a necessidade de observar o acumulado em períodos mais longos.

Os resultados apresentados levam à conclusão de que os deslizamentos tiveram a intensidade da chuva como principal fator, mas que a consideração da área de risco, tipo de solo, topografia, declividade e outros fatores, devem ser também incorporadas na análise das ocorrências. No entanto, estudos mostram que existe uma correlação direta entre chuvas intensas e o aumento da ocorrência de deslizamentos de terra. Vale ressaltar que como demonstrado no trabalho, houveram situações em que acumulados baixos de precipitação geraram deslizamentos. Acúmulos baixos de chuva também podem desencadear deslizamentos de terra, embora de uma maneira um pouco diferente dos eventos de chuva intensa. Têm-se por exemplo o efeito gradual, que foi apresentado por Tatizana (1987a) (Figura 1), sendo que embora os deslizamentos de terra geralmente estejam associados a chuvas intensas e prolongadas, acúmulos baixos de chuva ao longo do tempo também podem enfraquecer a estabilidade do solo. Mesmo pequenas quantidades de água infiltradas ao longo do tempo podem saturar o solo, tornando-o propenso a deslizamentos, especialmente em áreas com terreno íngreme. Mesmo que uma única chuva fraca possa não ser suficiente para desencadear um deslizamento de terra, acúmulos baixos de chuva ao longo de vários dias ou semanas podem ter um efeito cumulativo no solo. A saturação gradual do solo pode enfraquecer sua coesão e aumentar o risco de movimentos de massa.

O

monitoramento preciso do acúmulo de chuva é essencial para prever e mitigar os riscos de deslizamentos de terra. Sistemas de alerta precoce baseados em previsões meteorológicas e monitoramento contínuo das condições do solo podem ajudar a identificar áreas vulneráveis e tomar medidas preventivas, como evacuações e reforço de encostas. Além disso, estratégias de

gestão de bacias hidrográficas e planejamento urbano podem ajudar a reduzir a exposição a deslizamentos de terra, evitando o desenvolvimento em áreas de alto risco e implementando práticas de manejo de águas pluviais adequadas. Em resumo, o acúmulo de chuva é um dos principais fatores desencadeadores de deslizamentos de terra, como demonstrado no decorrer deste trabalho, destacando a importância do monitoramento, previsão e gestão adequados para reduzir os impactos desses eventos catastróficos.

Em relação aos cálculos dos percentis apresentados, Valores altos de percentis para chuvas indicam níveis de precipitação que excedem a maioria das ocorrências típicas. Quando se trata de chuvas, valores altos de percentis, como o p90 e p95, por exemplo, representam quantidades de precipitação que ocorrem em situações extremas. E são exatamente essas escalas de percentis (p90/p95), que foram relacionadas com eventos de alta precipitação que desencadearam números consideráveis de deslizamentos no município, um exemplo disso é a Tabela 7 da estação 83587, que descreve os valores de percentis e as quantidades de eventos de deslizamentos ocorridos. A importância do cálculo de percentis para limiares de chuva reside na sua capacidade de capturar a variabilidade espacial e temporal da precipitação. Isso permite uma melhor adaptação das estratégias de gestão de riscos às características específicas de cada região. Além disso, o uso de percentis facilita a comparação entre diferentes períodos de tempo e áreas geográficas, fornecendo uma base consistente para análises climáticas.

A Lei nº 11.181, de 8 de agosto de 2019, dispõe sobre o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte. O Plano constitui o instrumento básico da política urbana do município, que contém as diretrizes gerais para o desenvolvimento urbano e é também um instrumento orientador da elaboração de projetos de parcelamento do solo e de edificações em BH, na medida em que engloba as regras relativas ao parcelamento, ocupação e uso do solo na capital (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2020).

De acordo com o Plano, em decorrência das alterações climáticas, a tendência é haver um aumento de 32% em problemas associados a chuvas intensas em Belo Horizonte até 2030, ocasionando principalmente inundações e deslizamentos de encostas. Em relação à vulnerabilidade do uso e ocupação do solo, em 2030, estima-se que o número de bairros com alta vulnerabilidade sofrerá um acréscimo de 60% totalizando 331 bairros, havendo também ocupação em áreas de risco e aumento do número de periferias (PLANO DIRETOR DE BELO HORIZONTE, 2019). Ainda de acordo com o Plano, as regionais Noroeste, Oeste e Nordeste são aquelas com os maiores aumentos de bairros vulneráveis. O eixo Sul apresenta uma maior sensibilidade biofísica aos deslizamentos por sua constituição geológica e geomorfológica.

Existe uma tendência em que a porção Norte se apresente mais impactada por aumentos de temperatura, o que favorece as ocorrências de ondas de calor.

De acordo com dados da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2023), a cada ano menos edificações são construídas em áreas de risco. As necessidades de remoção diminuíram e a prefeitura hoje monitora um grupo menor de pessoas e atua na mitigação do risco de deslizamentos. Entretanto, a ocupação de áreas de risco continua a ser uma característica contínua em Belo Horizonte segundo informações da Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte (URBEL). Assim, a identificação de limiares que contribuam para o aprimoramento do Monitoramento e Emissão de Alertas de Desastres associados à movimento de massa é ainda extremamente necessário.

A problemática dos eventos de deslizamentos de terra em Belo Horizonte envolve não somente os elevados índices de precipitação que se prolongam por semanas, mas também a vulnerabilidade da cidade frente aos riscos geológicos, principalmente a alta ocupação em áreas de risco. As principais causas de situações de risco e desastres em Belo Horizonte estão nas áreas de morros e encostas e nas margens dos córregos que formam as bacias do Rio Arrudas, do Córrego do Onça e do Córrego Isidoro. Com aproximadamente 2,4 milhões de habitantes e 335 km², Belo Horizonte possui cerca de 200 áreas de vilas e favelas onde o risco geológico decorre de processos de escorregamento, erosão, queda e rolamento de blocos de rochas. Nas áreas sujeitas a escorregamentos com ocupação desordenada, que abrigam cerca de 22% da população do município, esses processos são frequentemente potencializados por fatores externos, como cortes no terreno, cultivo inadequado do solo, aterros mal executados, tubulações rompidas ou clandestinas, lançamento de esgoto e deposição de lixo/entulho nas encostas e cursos d'água, que podem gerar acidentes com danos ao patrimônio ou até mesmo perda de vidas humanas.

7 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados da presente pesquisa, pôde-se observar que os limiares de precipitação que mais se associam com a ocorrência de deslizamentos estão na classe “Intensa” ($\geq$ percentil 95 e $<$ percentil 99), representando um acumulado de precipitação entre 90 e 150 mm em 24h, com poucas exceções.

Em relação a estação meteorológica Buritis, que apresenta ausência de dados, o que configura ela como uma estação com uma porcentagem maior de erros, já que há dados faltantes e o cálculo é baseado nos dados, a justificativa plausível para a estação apresentar ausência de dados se dá pela localização. De acordo com pesquisas bibliográficas realizadas acerca da estação, essa está localizada “Sotavento” estando protegida dos ventos predominantes e consequentemente, a chuva. Uma estação meteorológica no sotavento é posicionada de forma a minimizar a influência direta do vento sobre os instrumentos de medição. Isso é importante para garantir que os dados registrados sejam representativos das condições locais, sem serem afetados por turbulências ou obstruções causadas pelo vento.

Considerando a extensão territorial do Brasil, destaca-se que a densidade de estações meteorológicas ainda é muito baixa, especialmente quando comparada com aquelas de países mais desenvolvidos, (ex. Japão). Além disso, a grande maioria das séries temporais mais longas de chuvas, ainda possuem um alto percentual de falhas, tornando desafiador realizar estudos que necessitem de médias climatológicas. No presente estudo, a exemplo de série histórica oriunda da estação com dados precários, têm-se Buritis, que apresenta dados inconsistentes quando comparados com as outras estações próximas, sendo, portanto, descartada das análises dos limiares.

Este trabalho avaliou os limiares para os percentis de chuva acumulada em 24h e 120h, no entanto, alguns casos ultrapassar estes percentis, não correspondeu a um aumento no número de ocorrências. Nestes casos, os acumulados de chuva pretéritos (dias ou semanas), especialmente nos meses de dezembro e janeiro, contribuíram para o elevado número de ocorrências. Assim, se um ou dois meses da estação chuvosa da região, registrarem chuvas acima da média, não é necessário que os acumulados de 24h e 120h sejam tão elevados. Então mesmo com chuva fraca (Percentil 50) ou ausência de chuva, novos deslizamentos podem acontecer devido a umidade e resistência do solo, não na mesma magnitude ou quantidade, mas ainda requer muita atenção.

A constante ocorrência de desastres naturais gera impactos sociais e econômicos cada

vez maiores, impondo a necessidade de elaborar estratégias de prevenção e redução de riscos. No cenário de Minas Gerais, os desastres causados por eventos geo-hidrológicos representam maior parte das ocorrências, sendo muitas vezes acidentes de maior exposição e consequências ocasionados por deslizamentos. À vista disso, as iniciativas de prevenção de desastres necessariamente passam pelo detalhamento do conhecimento do problema, o que deve orientar o estabelecimento de metas de ações de redução de risco, instrumento de gestão e resposta e ainda sistema de monitoramento e alerta.

O CEMADEN, em âmbito nacional, conta com mapeamentos dos locais de risco, rede de coleta de dados meteorológicos que subsidiam previsões de eventos geo-hidrológicos e estabelece padrões em comportamentos pluviométricos nas regiões de monitoramento. Com tais ações, o CEMADEN promove esforços no mapeamento dos riscos, em escalas adequadas e o investimento na estruturação de redes de monitoramento amplamente desenvolvidas.

Por fim, diante de um cenário de desastre, Belo Horizonte, em consequência de suas características topográficas e suas bacias hidrográficas, possui áreas de encostas e baixadas com ocupações sujeitas a desastres, cujos riscos potenciais são agravados durante o período chuvoso. Nesse contexto, é fundamental enfrentar os atuais desafios com foco em monitoramentos, avaliação e compreensão do risco de desastres, emissão de alertas precoces e ações de respostas efetivas nas situações de calamidade. Dentro do panorama de risco e deflagração de deslizamentos, este trabalho teve como principal objetivo a caracterização de Belo Horizonte quanto aos riscos de deslizamentos, bem como áreas de risco, caracterização hidro meteorológicas e cálculos de percentis, o que contribui altamente para a comunidade acadêmica e para os órgãos governamentais nas ações de enfrentamento dos deslizamentos em Belo Horizonte.

Sendo assim, torna-se necessário compartilhar informações para o fortalecimento da governança do risco de desastres e coordenação entre as instituições e os setores relevantes. Revela-se importante, também, a participação plena e significativa de todos os envolvidos, com investimentos em resiliência por meio de pesquisas, novas tecnologias e melhoria em sistemas de alerta precoce e comunicação, preparação, resposta, recuperação, reabilitação e reconstrução.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. Enchentes e deslizamentos provocam 38 mortes em MG. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-01/enchentes-e-deslizamentos-provocam-38-morte-em-mg>>. Acesso em: 02 março de 2023

ALVES, E.; PRADO, M. F.; SILVA, S.; VIEIRA, F.; SILVA, G. Análise Climática da Precipitação em Israelândia-GO e Piranhas-GO utilizando o índice de anomalia de chuva (IAC). Enciclopedia Biosfera, [S. l.], v. 6, n. 11, 2010. Disponível em: <<https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/4298>>. Acesso em: 1 julho de 2023.

ASSIS, W. L. O sistema climático urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva temporo-espacial. 2010. Tese (Doutorado)—Universidade Federal de Minas Gerais - Instituto de Geociências. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/MPBB-89XH5T>>. Acesso em: 5 de janeiro de 2024

BARROSO, Lucas T. P. Chuvas Persistentes e Ação da Zona de Convergência do Atlântico Sul na Região Metropolitana de Belo Horizonte. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BIGARELLA, J. J. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais. Nature, volume 3. Florianópolis: Editora UFSC, 2003.

CALVELLO, M. The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of performance for the years 2010–2013. International Journal of Disaster Risk Reduction, [s.l.], v. 12, p. 3-15, 2015.

CAMARINHA, P. I. M. Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenário de mudanças climáticas na Porção Paulista Serra do Mar. 2016. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CÂNDIDO, D. H.; NUNES, L. H. Influência da orografia na precipitação da área entre o Vale do Rio Tietê e a Serra da Mantiqueira. GEOUSP: espaço e tempo, São Paulo, n. 24, p. 08-27, 2008.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de riscos de deslizamento em encostas: guia para elaboração de políticas municipais. Brasília: MCidades; Cities Alliance, 2006.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas em Áreas Urbanas. In: MORAIS, M. P.; KRAUSE, C.; NETO, V. C. Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros. Brasília: Ipea, 2016. ISBN: 978-85-7811-276-9.

CEMADEN. Manual técnico para produção, transmissão e uso de alertas de risco de movimentos de massa. São José dos Campos, v.2 Brasil, 2018. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/Volume2-ManualTecnicoParaElaboracaoTransmissaoeUsodeAlertas_CEMADEN.pdf>. Acesso em: 30

de junho de 2022.

CEMADEN. Previsão de Riscos Geo-Hidrológicos. Cemaden/MCTI, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/riscos-geo-hidrologicos/23-02-2020-previsao-de-risco-geo-hidrologicos>>. Acesso em: 10 de maio de 2022;

CLIMATEMPO. Alguns números da chuva de março de 2020 no Brasil. Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.climatepo.com.br/noticia/2020/03/31/alguns-numeros-da-chuva-de-marco-de-2020-no-brasil-9457>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

CPETEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Boletins Infoclima. Brasil, 2010. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 08 de junho de 2022

CPETEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Boletins Infoclima. Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

CPRM. Conceitos Fundamentais de Risco e de Áreas de Risco. Serviços Geológicos do Brasil, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22448/1/atlas_riscos_geologico_hidrologico_ES_v1.pdf>. Acesso em: 02 de abril de 2022.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides Types and Process. In: TURNER, A.; SCHUSTER, R. (Ed.). Landslides- Investigation and Mitigation, Special Report 247. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996, p. 36-75.

CRUZ, J. P. M.; NUNES, M. S.; AZEVEDO, R. J. G. Planejamento urbano e áreas predispostas a risco geológico em Belo Horizonte: Limitações da lei de parcelamento, ocupação e uso do solo. Caminhos de Geografia, Uberlândia, 2019.

CUNHA, C. M. L.; MENDES, I. A.; SANCHEZ, M. C. A Cartografia do Relevo: Uma Análise Comparativa de Técnicas para a Gestão Ambiental. Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 4, nº 1, 2003.

DAMASCENO, A. D. O.; CARDOSO, A. Discussão sobre os limiares críticos de precipitação na Gestão de riscos a movimentos de massa no Brasil. Universidade Federal do ABC. Santo André, São Paulo, 2018.

DEFESA CIVIL DE BELO HORIZONTE. Deslizamentos em áreas de risco. Prefeitura de Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <<https://www.pbh.gov.br>>. Acesso em: 07 de abril de 2021.

DIAS, Mariane Carvalho de Assis; SAITO, Silvia Midori; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; SELUCHI, Marcelo Enrique; BERNARDES, Tiago; CAMARINHA, Pedro Ivo Mioni; STENNER, Cláudio; NOBRE, Carlos Afonso. Vulnerability index related to populations at-risk for landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 49, 2020, p. 101742. ISSN 2212-4209. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101742>>. Acesso em: 13 de maio de 2021.

DOS SANTOS, B. C.; SANCHES, R. G.; SILVA, M. S. D.; KAYANO, T. Y. K.; DE SOUZA, P. H.; TECH, A. R. B. Análise do efeito orográfico por meio da interpolação de índices

climáticos. *Revista de Geografia*, v. 8, 2018.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Planaltina-DF: EMBRAPA, 2004.

DUFEEK, A. S.; AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, n. 3, p. 167–178, 2008.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Classes de Declividade. São Paulo, Brasil, 1979.

FILHO, A. C. Modelo experimental baseado na declividade da encosta para avaliação do risco de deslizamento. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2012.

FREITAS, L. C.; EVERINO, E. A. S.; ESTELA, M.; COSTA, R. A. Eventos extremos de precipitação na cidade de Ituiutaba, MG. *Revista Geografia Física e as Mudanças Globais*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Anuário Estatístico de Minas Gerais 2000/2001. Belo Horizonte, 2002.

G1 MINAS. Mortes por deslizamentos na capital Mineira - O cenário de 2022. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/minas-gerais/>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2023.

GOUVEA, R. L.; CAMPOS, C. C.; MENEZES, J. T.; MOREIRA, G. F. Análise de frequência de precipitação e caracterização de anos secos e chuvosos para a bacia do Rio Itajaí. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 22, nº 14, p. 309-323, 2018.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, v. 18, p. 1326-1350, 2005.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16: 13-20, 1977.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98: 239-267, 2007.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5: 3-17, 2008.

HAYLOCK, M. R. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 2006.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. O Manual de Deslizamento: Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2008.

HUANG, J.; JU, N. P.; LIAO, Y. J.; LIU, D. D. Determination of rainfall thresholds for shallow landslides by a probabilistic and empirical method. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 2715-2723, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil em Síntese: Cidades do Brasil, 2010. Disponível em: < https://mapasinterativos.ibge.gov.br/atlas_ge/brasil1por1.html/>. Acesso em: 22 de março de 2023.

IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391, 2021.

JARDIM, C. H. “Médias” e “desvios” na análise geográfico climatológica: o episódio de chuva concentrada do dia 23 de novembro de 2010 e o veranico de janeiro/fevereiro de 2011 em Belo Horizonte - MG. *Geografias*, Belo Horizonte, 2012.

KARL, T. R.; KNIGHT, R. W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, p. 231-241, 1998.

LUCAS, T. P. B.; ABREU, M. L. Caracterização climática dos padrões de ventos associados a eventos extremos de precipitação em Belo Horizonte - MG. *Cadernos de Geografia*, Belo Horizonte, v. 14, n. 23, p. 135-152, 2004.

MAPBIOMAS. Coleções MapBiomas Brasil. Projetos Biomas, Brasil, 2020. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 12 de abril de 2021.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. Clima da Região Amazônica. In: CAVALCANTI, N. J.; et al. (Org.). *Tempo e clima no Brasil*. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

MOLINA, E. A. N.; CARDOSO, A. O.; NOGUEIRA, F. R. Relação precipitação deslizamento no município de São Bernardo do Campo – SP. *Ciência e Natura*, 37: 46-54, 2015.

PAZINI PEDRO, D. F.; FREITAS, A. C. V.; BELOTTI, F. M. A influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na ocorrência de deslizamentos de massa em Belo Horizonte e cidades vizinhas. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 16, Vol. 27, 2020.

PEAR, Programa Estrutural em Área de Risco. Áreas de Risco. Prefeitura de Belo Horizonte, Minas Gerais, 2023.

PENA, L. L. S.; LADISLAU, F. F. Crítica ao zoneamento de uso e ocupação do solo como um instrumento de gestão na sub-bacia hidrográfica do ribeirão da cachoeirinha - Belo Horizonte/Minas Gerais. In: *I Congresso Nacional de Geografia Física*. UNICAMP, Campinas, 2017.

PEREIRA, L. C.; LOMBARDI, N. F. Avaliação da obtenção agrícola das terras: proposta metodológica. Embrapa Meio Ambiente, 2004.

PLANO DE CONTINGÊNCIA 2021/2022 PARA ENFRENTAMENTO DE DESASTRES EM BELO HORIZONTE. Prefeitura de Belo Horizonte, Grupo Gestor de Risco e Desastre, 2022.

PLANO DIRETOR DE BELO HORIZONTE. Diretrizes para a Implantação Urbana de Belo Horizonte – Projeto de Lei Regulador do Uso e Ocupação da Terra. Minas Gerais, 2019.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Serviços. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2023.

PRISTO, M. V. J.; DERECZYNSKI, C. P.; DE SOUZA, P. R.; MENEZES, W. F. Climatologia de Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 4, p. 615-630, 2018.

SANTOS, B. C.; SANCHES, R. G.; NEVES, G. Z. F.; SOUZA, P. H. Efeito da orografia nas chuvas por meio da análise de índices climáticos na região do Planalto Ocidental Paulista. *Mercator, Fortaleza*, v. 22, 2023.

SEGONI, S.; PICIULLO, L.; GARIANO, S. L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15: 1483-1501, 2018.

SENEVIRATNE, S. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: FIELD, C. B. et al. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: UniversityOf Cambridge Press, 2012. Cap. 3. p. 109-230.

SOUZA, N. P. Aplicação do Estimador de Densidade kernel em Unidades de Conservação na Bacia do Rio São Francisco para análise de focos de desmatamento e focos de calor. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 16. Foz do Iguaçu-PR, Anais, 2013.

STABILE, R. A.; LUIZ, R. A. F.; FERREIRA, A. M.; EGAS, H. M.; de ANDRADE, M. R. M. Potencialidades dos Limiares de Chuva Intensidade-Duração na Previsão de Deslizamentos em Jaraguá do Sul (SC). *Derbyana, São Paulo*, 43: e772, 2022.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, município de Cubatão. In: ABGE, *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*, 5, São Paulo, Anais, 2: 225-236, 1987.

TAVARES, R. B.; NOGUEIRA, N. R. M. L.; VOLPON, I. Q. Deslizamento de solo/aterro - estudo de caso: Vila Bandeirantes – Belo Horizonte, MG. *Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental*, Belo Horizonte, 2012.

UNDRR. United Nations Office for Disasters Risk Reduction. Disaster, 2015. Disponível em <<https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/sendai-framework-action/early-warnings-for-all>> Acesso em: 13 de agosto de 2023.

URBEL. Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte. Minas Gerais, 2023. Disponível em <<https://prefeitura.pbh.gov.br/urbel/licitacao/chamamento-publico-003-2023>>.

Acesso em: 27 de outubro de 2023.

WAY CARBON. Vulnerability Assessment to Climate Change in the Municipality of Belo Horizonte - Brazil. Summary for Policymakers, 2016.

XAVIER, H.; OLIVEIRA, L. Área de risco de deslizamento de encostas em Belo Horizonte. Cadernos de Geografia, Belo Horizonte, v. 6, n. 8, p. 53-70, 1996.