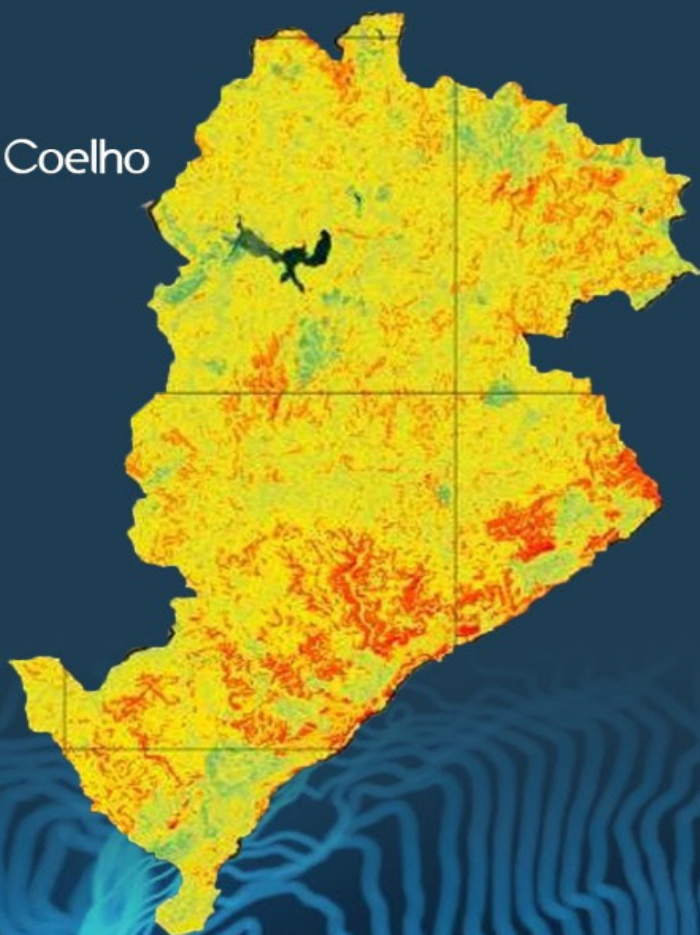


BELO HORIZONTE EM ALERTA

IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS CRÍTICAS DE DESLIZAMENTO
COM TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Bernardo França de Souza
Leonardo França da Silva
Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho
Cristiano Márcio Alves de Souza
José Rafael Franco
Victor Crespo de Oliveira
Rayza Roxane de Oliveira Leite



BERNARDO FRANÇA DE SOUZA
LEONARDO FRANÇA DA SILVA
CARLOS WAGNER GONÇALVES ANDRADE COELHO
CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA
JOSÉ RAFAEL FRANCO
VICTOR CRESPO DE OLIVEIRA
RAYZA ROXANE DE OLIVEIRA LEITE

**BELO HORIZONTE EM ALERTA: IDENTIFICAÇÃO
DE ZONAS CRÍTICAS DE DESLIZAMENTO COM
TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO**

EDITORA PASCAL

2025

Editor Chefe: Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: autores

Conselho Editorial

Dr. William de Jesus Ericeira Mochel Filho

Dr^a Aurea Maria Barbosa de Sousa

Dr^a Camila Pinheiro Nobre

Dr^a Gerbeli de Mattos Salgado Mochel

Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior

Dr^a Thais Roseli Corrêa

Dr^a Michela Costa Batista

Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S729b

Souza, Bernardo França de; França da Silva, Leonardo; Coelho, Carlos Wagner Gonçalves Andrade; Alves de Souza, Cristiano Márcio; Franco, José Rafael; Oliveira, Victor Crespo de; Leite, Rayza Roxane de Oliveira

Belo Horizonte em alerta: identificação de zonas críticas de deslizamento com técnicas de geoprocessamento / Bernardo França de Souza *et al.* — São Luís: Editora Pascal, 2025.

44 f. : il.:

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-161-3

D.O.I.: 10.29327/5595884

1. Deslizamento de terra. 2. Geoprocessamento. 3. Zona crítica. 4. Belo Horizonte. I. Souza, Bernardo França de. II. França da Silva, Leonardo. III. Coelho, Carlos Wagner Gonçalves Andrade. IV. Alves de Souza, Cristiano Márcio. V. Franco, José Rafael. VI. Oliveira, Victor Crespo de. VII. Leite, Rayza Roxane de Oliveira. VIII. Título.

CDU: 551.435.84:528.9(815.1):504.5

Qualquer parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros, desde que seja citado o autor.

PREFÁCIO

A crescente ocupação urbana desordenada, aliada ao aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas, tem intensificado significativamente os riscos geológicos em áreas urbanas, especialmente em grandes centros urbanos como Belo Horizonte. A capital mineira, com sua geografia montanhosa e ocupações em encostas íngremes, apresenta um histórico preocupante de vulnerabilidade socioambiental. Muitos dos bairros mais afetados por deslizamentos foram desenvolvidos sem planejamento adequado, em áreas de risco, com infraestrutura precária e ausência de políticas públicas efetivas de controle e prevenção. Nesse contexto, os deslizamentos de terra tornaram-se recorrentes, principalmente durante o período chuvoso, colocando em risco vidas humanas, patrimônios e a própria estabilidade ambiental da cidade.

Esse cenário alarmante impõe a necessidade urgente de soluções embasadas na ciência, na tecnologia e em práticas de planejamento urbano sustentável. A integração de ferramentas de geoprocessamento e métodos de análise multicritério, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), surge como uma alternativa promissora para apoiar a tomada de decisões em políticas públicas de prevenção e mitigação de desastres naturais. Tais ferramentas permitem a identificação, com precisão e agilidade, das áreas mais suscetíveis a deslizamentos, fornecendo subsídios para intervenções mais eficientes e assertivas.

É nesse contexto que se insere a presente obra, intitulada “*Belo Horizonte em Alerta: Identificação de Zonas Críticas de Deslizamento com Técnicas de Geoprocessamento*”, que tem como propósito contribuir de forma significativa para o conhecimento técnico e científico sobre os riscos geotécnicos no município de Belo Horizonte. A pesquisa aqui apresentada tem como objetivo geral identificar as principais áreas da cidade com maior risco de deslizamento de terra, por meio da aplicação do método AHP integrado ao geoprocessamento. Para alcançar esse propósito, foram estabelecidos três objetivos específicos: reunir os dados georreferenciados necessários para a execução do trabalho; aplicar a análise multicritério para a identificação das zonas críticas de risco; e, por fim, elaborar mapas temáticos que traduzam os resultados obtidos de forma clara e acessível.

Além da contribuição técnica, esta obra também visa fomentar uma cultura de prevenção e resiliência, sensibilizando gestores públicos, profissionais da área, pesquisadores e a sociedade em geral sobre a importância do planejamento territorial orientado por dados. Ao integrar ciência, tecnologia e responsabilidade social, o presente estudo oferece um caminho concreto

para a construção de políticas urbanas mais seguras e inclusivas, capazes de minimizar os impactos de desastres naturais e de promover a preservação da vida e do meio ambiente. Que este trabalho sirva como ferramenta de transformação, orientando ações efetivas em prol de uma cidade mais preparada, justa e resiliente.

Boa leitura!

AUTORES

Bernardo França de Souza



Engenheiro Ambiental e Sanitarista formado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) em 2025. Atua na área de geoprocessamento, com experiência em produção de ortofotos, processamento de imagens aéreas e desenvolvimento de fluxos automatizados para análise espacial. Experiência na aplicação de técnicas de visão computacional, com destaque para o uso de algoritmos de detecção de objetos como o YOLO (You Only Look Once) voltados à identificação automática de feições em ortofotos de alta resolução. Possui experiência com softwares como QGIS, Agisoft Metashape, ArcGIS Pro. Atua na interface entre meio ambiente e tecnologia, contribuindo para soluções técnicas inovadoras em mapeamento e monitoramento.

Leonardo França da Silva



Engenheiro Agrônomo (UFMG), Matemático e Engenheiro de Segurança do Trabalho, especialista em Engenharia de Produção. Mestre em Agronomia (UNESP), Doutor em Engenharia Agrícola (UFV) e Pós-Doutor em Engenharia Agrícola na UFGD, com foco em modelagem matemática em sistemas de produção agrícola. Atualmente Professor Adjunto I da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília - UnB. Possui experiência em Engenharia Agrícola, Construções Rurais, Desenho Técnico e Assistido por Computador, Sustentabilidade em sistemas de produção, Segurança do Trabalho, Ergonomia, Agricultura Digital e Sequestro de Carbono.

Cristiano Márcio Alves de Souza



Professor Titular da Universidade Federal da Grande Dourados. Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1999) e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2004). Orientador nos Programas de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) e Agronomia (Doutorado em Produção Vegetal) da UFGD. Áreas pesquisadas: projeto de máquinas agrícolas e pós-colheita de produtos agrícolas - atuando nos seguintes temas: agricultura digital e de precisão, colheita, semeadura, compactação do solo, tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas, secagem e aeração de grãos, modelagem, simulação e otimização de sistemas agrícolas, energia na agricultura.

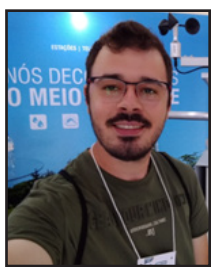
AUTORES

Carlos Wagner G. A. Coelho



Doutor em Geografia - Tratamento da Informação Espacial pela PUC- MINAS. Professor efetivo dos cursos de Graduação em Engenharia Ambiental e Técnico e Tecnológico em Meio Ambiente do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG). Foi chefe de Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental - DCTA - CEFETMG Gestão 2015-2017. Atualmente é coordenador do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária - CEFET-MG. Foi tutor do PET -Ambiental - Programa de Educação Tutorial, do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária Período 2020-2022. Membro do grupo de pesquisa “Grupo Transdisciplinar de Pesquisa e Extensão em práticas culturais do Heavy Metal”, chancelado pelo Cnpq. Coordenou os cursos de Pós-graduação Lato Sensu em Geoprocessamento e Gestão Ambiental no Centro Universitário UNA. Foi professor de Pós-graduação em Geoprocessamento da PUC VIRTUAL, professor do Centro Tecnológico UNATEC- UNA e professor do centro universitário UNI-BH. Trabalhou na Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG por 23 anos, destes, 12 como Técnico de Planejamento Hidro energético no setor de Meteorologia. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Climatologia Geográfica e Geoprocessamento, atuando principalmente nos seguintes temas: Análise espacial e climatologia e Educação Ambiental.

José Rafael Franco



Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia de Botucatu (2017). Especialização em Banco de Dados na UNICESUMAR em Botucatu (2019), Mestrado em Irrigação e Drenagem na Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu (2021). Graduando em Ciência de Dados pela Faculdade Univesp. Doutora em Engenharia Agrícola na Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu. Possui experiências nas áreas de Telecomunicações, Redes de Computadores, Desenvolvimento de Softwares, Banco de Dados, Agrometeorologia, Instrumentos Meteorológica, Microcontroladores e Aplicações de baixo custo no meio agrícola. Professor no Centro universitário Uneduvale desde 2023.

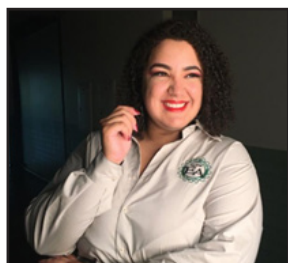
AUTORES

Victor Crespo de Oliveira



Docente no Centro Universitário Eduvale (Uneduvale), atuando nas disciplinas de Topografia e Agrometeorologia. Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual Paulista (Unesp/FCA) na linha de pesquisa de Engenharia Agrícola de Precisão. É mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2023), com ênfase em Construções Rurais e Ambiente, e Engenheiro Agrícola formado pela Universidade Federal de Lavras (UFLA, 2020). Possui experiência e colaborações com instituições nacionais (UFV, UFLA, UFMG, UEMG, UFGD, UFC, UEG e Unesp) e internacionais (Universidad Nacional de Colombia campus Medellín e Bogotá [UNAL], Universidade de Évora, University of Firenze, Iowa State University) em projetos de pesquisa científica. É autor e coautor de artigos de alto impacto na área de Ciências Agrárias e autor de livros na área de ciências agrárias. Atua nas áreas de Topografia, Agrometeorologia, Construções Rurais, Ambiente Animal, Instrumentação, Análise de Dados, Prototipagem e Desenvolvimento Tecnológico, com forte integração entre a pesquisa científica e a aplicação prática no campo. Desenvolve tecnologias voltadas ao setor agropecuário, abrangendo o projeto de equipamentos, desenvolvimento de softwares e aplicação de técnicas avançadas de análise e modelagem de dados, como machine learning, análise multivariada, e processamento de sinais e imagens.

Rayza Roxane de Oliveira Leite



Formada em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), durante a graduação, tive a oportunidade de participar ativamente do Projeto de Extensão “Armazenamento Seguro” (PAS) por três anos. No âmbito desse projeto, desempenhei diversas funções, incluindo a realização de palestras, o treinamento de novos integrantes e o desenvolvimento de estratégias de marketing. Essas atividades proporcionaram-me uma valiosa experiência prática e ajudaram a aprimorar minhas habilidades de comunicação, liderança, planejamento estratégico, aprimorar meu conhecimento sobre armazenamento, a importância da segurança nestes locais e importância da extensão dentro e fora da faculdade. Adicionalmente, fui bolsista de Iniciação Científica durante cinco meses, período em que me dediquei à pesquisa e desenvolvimento de projetos científicos. Esse envolvimento permitiu-me aprofundar meu conhecimento teórico e prático, além de fortalecer minhas competências em metodologias de pesquisa, análise de dados e elaboração de relatórios técnicos. No estágio realizado dentro da própria universidade, acompanhei a implantação e análise de uma pesquisa sobre o cultivo de feijão caupi em consórcio com forrageiras.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico)

GIS - *Geographic Information Systems* (Sistemas de Informações Geográficas)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IDE-SISEMA - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

MDE - Modelo Digital de Elevação

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

MCDA - *Multi-Criteria Decision Analysis* (Análise Multicritério de Decisão)

MAPBIOMAS - Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo do Brasil

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SUMÁRIO

PREFÁCIO.....	4
CAPÍTULO 1	11
PANORAMA INICIAL: DESAFIOS E JUSTIFICATIVAS PARA O ESTUDO DE ZONAS CRÍTICAS DE DESLIZAMENTO EM BELO HORIZONTE	
CAPÍTULO 2.....	15
OBJETIVOS DA OBRA: DIRECIONAMENTO TEMÁTICO E FINALIDADE CIENTÍFICA	
CAPÍTULO 3.....	17
PANORAMA CIENTÍFICO: MÉTODOS DE ANÁLISE GEOLÓGICA E MULTICRITÉRIO NA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO	
<i>Belo Horizonte.....</i>	<i>18</i>
<i>Deslizamento.....</i>	<i>20</i>
<i>Geologia e deslizamentos em Belo Horizonte.....</i>	<i>21</i>
<i>Geoprocessamento.....</i>	<i>22</i>
<i>Método AHP.....</i>	<i>24</i>
CAPÍTULO 4	26
ASPECTOS METODOLÓGICOS	
MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
<i>Área de Estudo.....</i>	<i>27</i>
<i>Coleta de Dados.....</i>	<i>27</i>
<i>Mapas Temáticos.....</i>	<i>27</i>
<i>Método AHP.....</i>	<i>30</i>
CAPÍTULO 5.....	32
RESULTADOS E DISCUSSÃO	
<i>Mapas dos critérios.....</i>	<i>33</i>
CAPÍTULO 6.....	38
CONSIDERAÇÕES FINAIS	
CAPÍTULO 7.....	40
PERSPECTIVAS FUTURAS	
REFERÊNCIAS	42

1

PANORAMA INICIAL: DESAFIOS E JUSTIFICATIVAS PARA O ESTUDO DE ZONAS CRÍTICAS DE DESLIZAMENTO EM BELO HORIZONTE



No Brasil, os deslizamentos estão entre os eventos que mais provocam danos à população, tanto em termos humanos quanto econômicos (IBGE, 2019). Apesar de serem fenômenos naturais, a interferência humana pode acelerá-los ou intensificá-los. Um dos fatores que agravam esses processos é a ocupação desordenada de áreas com maior risco de deslizamento, resultado de uma urbanização rápida e da falta de planejamento adequado (IBGE, 2019).

Minas Gerais é um estado brasileiro que possui, em seu território, grande quantidade de áreas com alto risco de deslizamento. Dados do IBGE (2018) indicam que cerca de 50% do território total do estado apresenta risco alto ou muito alto de deslizamento.

Belo Horizonte, a capital de Minas Gerais, é uma cidade onde parte da população vive em regiões que apresentam risco de deslizamento. Isso ocorreu devido à ocupação desordenada da cidade, sem um planejamento eficaz, fazendo com que áreas urbanas de alta densidade populacional frequentemente coincidam com zonas de risco, expondo milhares de moradores a potenciais desastres. Até o ano de 1993, a cidade apenas socorria as vítimas, sem realizar nenhuma ação preventiva. A partir de 1993, foi criado o Programa Estrutural em Áreas de Risco, com o objetivo de realizar vistorias e agir preventivamente para evitar deslizamentos (CASTRO, 2011).

Segundo Paolucci (2012), em meados do século XX, os deslizamentos de terra causaram a morte de dezenas de pessoas no município. Sendo assim, destaca-se a importância do planejamento urbano da cidade. Com um planejamento bem estruturado, é possível minimizar os impactos dos deslizamentos, proteger vidas humanas e garantir a segurança e a qualidade de vida dos moradores.

De acordo com Abranches (2009), a partir da década de 1990, novas tecnologias, como o geoprocessamento, começaram a ser amplamente implementadas para minimizar os problemas urbanos e planejar com maior eficiência. Essas ferramentas tecnológicas trouxeram avanços significativos ao permitir a análise detalhada de dados espaciais, facilitando a compreensão das dinâmicas urbanas e ambientais. Rosa (2005), define o geoprocessamento como um conjunto de tecnologias voltadas para a coleta, processamento e análise de informações com referência espacial. Ele é dividido em quatro categorias principais: coleta, armazenamento, tratamento e análise de dados espaciais, além do uso integrado de sistemas GIS (Geographic Information Systems), que potencializam a capacidade de análise por meio da modelagem de dados e simulações.

Segundo Alvim (2024), o geoprocessamento integra disciplinas como cartografia, análise espacial e ciência de dados, fornecendo uma abordagem robusta e interdisciplinar para resolver problemas complexos relacionados à ocupação do solo e à gestão territorial. Essa tecnologia possibilita a criação de mapas temáticos e a identificação de padrões espaciais, sendo fundamental para o planejamento urbano e ambiental.

Câmara et al. (2001), no artigo Conceitos Básicos em Geoprocessamento diz que o geoprocessamento não apenas integra disciplinas como cartografia e análise espacial, mas também organiza informações espaciais por meio de representações matriciais e vetoriais para estruturar dados geográficos, o que permite maior precisão e eficiência em análises espaciais complexas.

Farina (2006) destaca que o avanço das técnicas de geoprocessamento permite a integração de diversas fontes de informação, combinando dados de diferentes naturezas direcionados a aplicações específicas. Essa integração facilita a tomada de decisões que dependem de várias variáveis.

Os métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA, *Multi-Criteria Decision Analy-*

sis) são essenciais para problemas que envolvem múltiplos critérios, frequentemente em conflito e que precisam ser analisados em conjunto. De acordo com Ayala e Frank (2013), esses métodos auxiliam os tomadores de decisão ao organizar e sintetizar informações, permitindo uma decisão mais clara e fundamentada.

Entre os métodos de Análise de Decisão Multicritério, o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) se destaca. Ele é aplicado em decisões complexas, que podem envolver um grande número de variáveis e uma quantidade significativa de dados (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

O método AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty, é uma abordagem de decisão multicritério aplicada para resolver problemas complexos. Entre suas aplicações mais eficientes estão a determinação de prioridades, otimização, planejamento, previsão de dados e avaliação de riscos (SANTOS, 2008). Dessa forma, o método desempenha um papel importante no auxílio à análise de dados e na compreensão de trabalhos que envolvem uma ampla gama de variáveis. Quando incorporado às análises espaciais disponíveis no GIS, ele proporciona maior confiabilidade nos resultados.

A identificação de áreas com maior risco de deslizamento é considerada complexa, pois depende de diversos fatores. O IBGE (2009) define alguns desses fatores, como geologia, geomorfologia, declividade e pluviosidade. Alguns estudos têm sido realizados ao longo do tempo utilizando o método AHP aliado às diversas técnicas de geoprocessamento para relacionar esses fatores e identificar áreas de risco. Katayasha *et al.* (2013) utilizaram o método para avaliar a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de terra na província de Trabzon, situada no nordeste da Turquia. Os resultados encontrados foram satisfatórios, gerando dados confiáveis que podem ser essenciais no planejamento de ocupação e uso da terra da região.

Outro estudo foi realizado na cidade de New Tehri, no estado indiano de Uttarakhand. Nesse trabalho, dados geológicos, topográficos e de solo foram combinados através do geoprocessamento e do método AHP. O objetivo foi identificar as áreas próximas ao reservatório da cidade com maior risco de deslizamento. Os resultados desse estudo também foram satisfatórios (KUMAR; ROHAN; ANBALAGAN, 2016).

No Brasil, um estudo realizado por Assis *et al.* (2020) foi conduzido no município de Rio Piracicaba, no estado de Minas Gerais. Nesse trabalho, foi elaborado um mapa de risco geológico-geotécnico de movimentos de massa.

O estudo analisou quatro bairros urbanos, utilizando imagens aéreas obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e integradas a um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Dados relacionados a estabilidade do solo, características geológicas, presença de declividades, drenagem e presença de escoamento de água foram analisados.

Como resultado, foram delimitadas 14 áreas, classificadas e hierarquizadas conforme o grau de vulnerabilidade. Dessa forma, foi possível determinar quais áreas têm maior necessidade de intervenções para mitigar os riscos. Os resultados demonstraram a eficiência do método e da combinação de diferentes variáveis para identificar com precisão as áreas mais vulneráveis, fornecendo, assim, informações valiosas para o planejamento e a gestão do uso do solo na região.

Dessa forma, a identificação de áreas com maior risco de deslizamento, principalmente em cidades que apresentam características que contribuem para esse risco, é de extrema importância. Nesse contexto, o geoprocessamento é uma tecnologia essencial, já que tem a capacidade de integrar e analisar dados georreferenciados. Essa tecnologia, aliada à avaliação multicritério, pode ser eficiente para identificar essas áreas, pois vários fatores

contribuem para que uma área tenha maior risco de deslizamento de terra e é possível analisar esses fatores em conjunto utilizando a análise multicritério.

Assim, o presente trabalho busca apresentar os fatores que aumentam o risco de deslizamento de terra em Belo Horizonte, reunir os dados georreferenciados necessários de cada um desses fatores e aplicar a análise multicritério para a identificação das áreas vulneráveis, culminando na criação de mapas temáticos com os resultados obtidos.

2

OBJETIVOS DA OBRA: DIRECIONAMENTO TEMÁTICO E FINALIDADE CIENTÍFICA



Diante da crescente urbanização desordenada e dos impactos associados aos eventos geodinâmicos, especialmente os deslizamentos de terra em áreas urbanas, este trabalho propõe-se a contribuir com a identificação e mapeamento das regiões mais suscetíveis a esse tipo de ocorrência no município de Belo Horizonte. Para isso, estabelece-se como objetivo geral identificar as principais áreas da cidade com maior risco de deslizamento de terra, utilizando o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), integrado a ferramentas de geoprocessamento.

A fim de atingir esse propósito, o estudo também se baseia nos seguintes objetivos específicos:

- Reunir os dados georreferenciados necessários para a realização das análises espaciais, contemplando aspectos físicos, ambientais e antrópicos relevantes para a modelagem do risco;
- Aplicar a análise multicritério, com base no método AHP, para a identificação das áreas mais vulneráveis a deslizamentos de terra em Belo Horizonte;
- Desenvolver e apresentar mapas temáticos que representem visualmente os resultados obtidos, permitindo uma melhor compreensão espacial das áreas de risco e subsidiando ações de planejamento urbano e prevenção de desastres.

Com base nesses objetivos, o trabalho visa não apenas contribuir com a literatura técnica e científica sobre o tema, mas também fornecer uma ferramenta útil para gestores públicos, planejadores urbanos e instituições responsáveis pela defesa civil.

3

PANORAMA CIENTÍFICO: MÉTODOS DE ANÁLISE GEOLÓGICA E MULTICRITÉRIO NA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO



Belo Horizonte

Belo Horizonte é um município brasileiro e a capital do estado de Minas Gerais. Conforme dados do censo de 2022, a cidade possui uma população de 2.315.560 habitantes, o que a torna o sexto município mais populoso do país, o terceiro mais populoso da Região Sudeste, e o mais populoso de Minas Gerais (IBGE, 2023).

Inicialmente, a cidade foi planejada, mas apresentou um crescimento populacional acelerado e inesperado, alcançando mais de um milhão de habitantes com quase setenta anos de fundação. Este crescimento considerável da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) aconteceu devido a especulação imobiliária e a expansão urbana e industrial (LUCAS, 2007).

Com um crescimento acelerado e desorganizado, em 1912, apenas 15 anos após sua fundação, cerca de 60% da população já residia em áreas classificadas como rurais ou suburbanas (LIBÂNIO, 2016). Em 1955, mais de 36 mil pessoas moravam em favelas, e esse número chegou a 120 mil em 1965 (LIBÂNIO, 2016). As políticas públicas de Belo Horizonte, ao longo do tempo, oscilaram entre a remoção de famílias e a urbanização das áreas ocupadas. Até a década de 1980, predominou uma visão “remocionista”, na qual mais de 60 mil pessoas foram reassentadas em outros locais (LIBÂNIO, 2016).

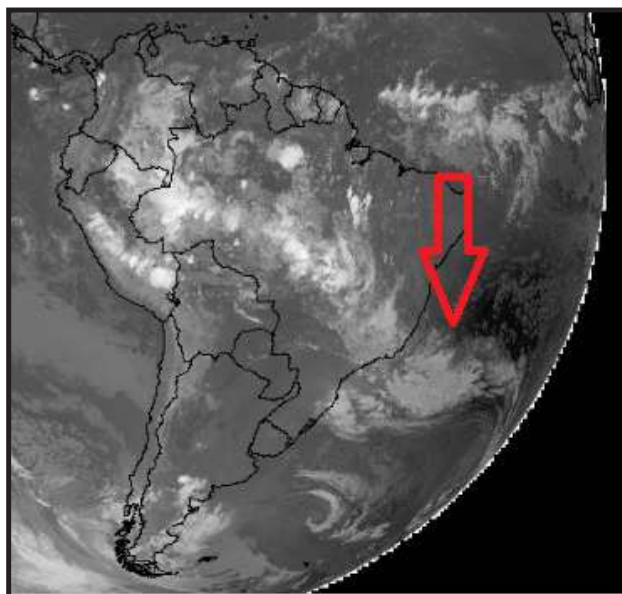
A partir da década de 1980, as políticas públicas de Belo Horizonte mudaram o foco da remoção das pessoas para a urbanização das favelas. Esse período foi marcado pela implementação do Programa de Desenvolvimento de Comunidades (Prodecom) em 1981, pela aprovação da Lei do Programa Municipal de Regularização de Favelas (Profavela) em 1983 e pela criação da Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte (Urbel) em 1986. A partir desse ponto, o poder público começa a reconhecer esses territórios como parte integrante da cidade, entendendo que eles devem ser consolidados tanto do ponto de vista urbanístico quanto jurídico (LIBÂNIO, 2016).

Apesar dos avanços, as áreas nas quais as favelas normalmente estão localizadas são naturalmente inadequadas e suscetíveis a riscos naturais. Um desses riscos é o deslizamento e esse fenômeno se agrava significativamente devido às chuvas persistentes. Conforme aponta Quadro (1994), entre os eventos meteorológicos que contribuem para episódios de deslizamentos destaca-se a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se configura como o principal sistema regulador das precipitações durante o verão na América do Sul, sendo, portanto, de grande relevância para a previsão do tempo e do clima.

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é caracterizada como um corredor de nuvens que atravessa o Brasil, estendendo-se desde o sul da Região Amazônica até o Oceano Atlântico, passando pela área central do País. Eventualmente, a ZCAS pode deslocar-se para o norte ou para o sul, alcançando os estados da Bahia e do Paraná.

Esse sistema é facilmente reconhecível em imagens de satélite pela disposição organizada das nuvens. A Figura 1 mostra a Zona de Convergência do Atlântico Sul. Entre os meses de novembro e fevereiro, os episódios de ZCAS costumam se formar, com uma duração média de quatro a dez dias, causando volumes significativos de precipitação nas regiões afetadas.

Figura 1. Zona de Convergência do Atlântico Sul.



Fonte: NASA (2022).

Conforme o Boletim Técnico da Defesa Civil de Minas Gerais (2018), na cidade de Belo Horizonte e nas regiões metropolitanas, ocorrem desastres de natureza geológica, meteorológica e hidrológica durante o período chuvoso. Esses desastres incluem inundações, alagamentos e enxurradas, que são considerados fatores desencadeantes de deslizamentos de terra.

Observa-se que a ZCAS é uma das principais responsáveis pelas mais severas cheias e inundações nas regiões centro-sul do Brasil nos verões, causando consequências desastrosas para a população urbana dessas áreas. Nos períodos mais chuvosos do ano, são frequentes as notícias de deslizamentos de massa veiculadas pela mídia em Minas Gerais, destacando perdas de propriedades, prejuízos econômicos significativos e até fatalidades (BELLOTI *et al.*, 2020).

A mídia noticia com frequência os casos de deslizamentos de terra que ocorrem em Belo Horizonte e os danos causados à população e às estruturas da cidade. Em janeiro de 2022, o portal G1 informou que cinco das nove regionais de Belo Horizonte estavam sob risco geológico devido ao elevado volume de chuvas típico desse período. Nessa mesma época, ocorreu um deslizamento de terra na Avenida Antônio Carlos (Figura 2) e o desabamento de uma casa localizada no bairro Vila Leonina, na região Oeste (Figura 3).

Figura 2. Deslizamento de Terra Antônio Carlos.



Fonte: G1 (2022).

Figura 3. Desabamento de casa Vila Leonin



Fonte: Estado de Minas (2022).

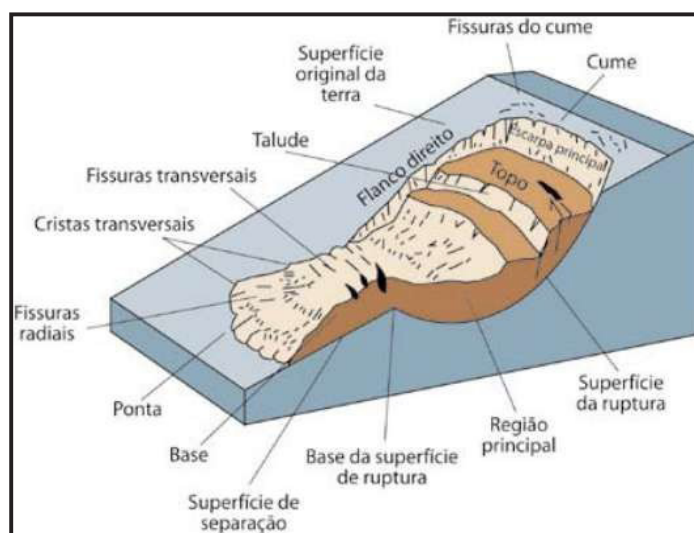
Deslizamento

A definição de deslizamento não é totalmente uniforme quando se comparam as diferentes definições de diferentes autores. Isso ocorre porque o deslizamento é um fenômeno complexo, afetado por vários fatores. Apesar dessa variedade, duas definições abrangem de maneira assertiva o conceito. De acordo com Cruden (1991), deslizamentos são os movimentos de rocha e solo das partes mais elevadas para as partes mais baixas do relevo.

Highland (2008), em publicação realizada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos, define deslizamento como o movimento descendente de rocha, materiais orgânicos ou solo. Esse fenômeno pode variar em escala, desde pequenos deslocamentos até movimentos de grande magnitude capazes de afetar áreas extensas. A complexidade dos deslizamentos deve-se à variedade de suas causas, que abrangem fatores naturais, como chuvas intensas e atividades sísmicas, bem como interferências humanas, como a ocupação desordenada e as alterações no uso do solo.

Os termos utilizados para descrever e indicar as partes específicas de um deslizamento também variam de autor para autor, os termos mais comuns usados para descrever as partes específicas de um deslizamento estão representados na Figura 4.

Figura 4. Denominações comumente utilizadas para um Deslizamento



Fonte: Varnes (1978) apud Highland (2008).

No Brasil, um termo muito utilizado para o deslizamento é “movimento gravitacional de massa”. Esses movimentos são um fenômeno natural que pode ser acelerado pela intervenção humana. Quando ocorrem em áreas urbanizadas, podem se transformar em um problema, causando mortes e grandes prejuízos materiais. A ação humana, como a ocupação desordenada e a alteração da cobertura vegetal, pode intensificar a frequência e a severidade desses eventos (DIAS; HERRMANN, 2002).

Além das interferências humanas, outros fatores contribuem para o aumento do risco de deslizamento. Esses fatores também variam de autor para autor. Um dos mais importantes realizados no Brasil acerca do tema foi a “Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil - Primeira Aproximação” realizado pelo IBGE em 2019.

O estudo do IBGE (2019) utilizou diversos fatores para identificar as áreas mais vulneráveis. A geologia foi o primeiro fator analisado e ela fornece informações sobre a composição e a estrutura das rochas, permitindo, assim, uma melhor compreensão da estabilidade do local.

A declividade do terreno, outro fator utilizado, é um dos principais elementos de risco, já que terrenos mais inclinados têm maior probabilidade de sofrer deslizamentos. O uso e a cobertura da terra também foram incluídos na análise, evidenciando como a ocupação humana e a alteração do ambiente natural podem intensificar os riscos.

Além disso, os dados sobre pluviosidade foram analisados, pois indicam a influência das chuvas na saturação do solo, um fator determinante para o desencadeamento de deslizamentos.

Diversos estudos já foram realizados sobre o tema e os fatores utilizados para identificar as áreas de maior risco de deslizamento variam de autor para autor. Yalcin *et al.* (2011), em estudo realizado na Turquia, utilizou oito fatores diferentes para determinar o risco de suscetibilidade a deslizamentos. Esses fatores foram: geologia, declividade, altitude, cobertura da terra, distância de estradas, distância de fluxos de água e direção da inclinação.

Silveira, Vettorazzi e Valente (2014) realizaram um mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de terra no sul do estado de São Paulo. Os fatores utilizados foram: geologia, tipo de solo, declividade do terreno, uso e cobertura do solo e precipitação.

Geologia e deslizamentos em Belo Horizonte

Segundo Parizzi (2021), Belo Horizonte é composta por quatro formações geológicas principais: o Complexo Belo Horizonte, os Grupos Sabará, Piracicaba e Itabira. Cada um desses grupos apresenta características litológicas e estruturais que influenciam diretamente os riscos de deslizamentos na região. Essas formações estão representadas na Figura 5.

Figura 5. Imagem aérea que representa as formações geológicas de Belo Horizonte



Fonte: Parizzi (2021).

O Complexo Belo Horizonte ocupa cerca de 70% do território municipal e é caracterizado principalmente por gnaisses. Essas rochas são mais resistentes e menos suscetíveis a movimentos de massa, exceto em áreas altamente intemperizadas (PARIZZI, 2021).

O Grupo Sabará é formado principalmente por filitos e xistos, rochas que são mais intemperizadas. Devido a isso, esse grupo é mais suscetível a deslizamentos, especialmente em encostas íngremes e regiões com elevada saturação do solo (PARIZZI, 2021).

O Grupo Piracicaba inclui filitos e quartzitos. Os quartzitos apresentam maior resistência aos deslizamentos que os filitos. O Grupo Itabira, é composto de por itabiritos e dolomitos, também possui uma resistência relativa ao deslizamentos mais elevada (PARIZZI, 2021).

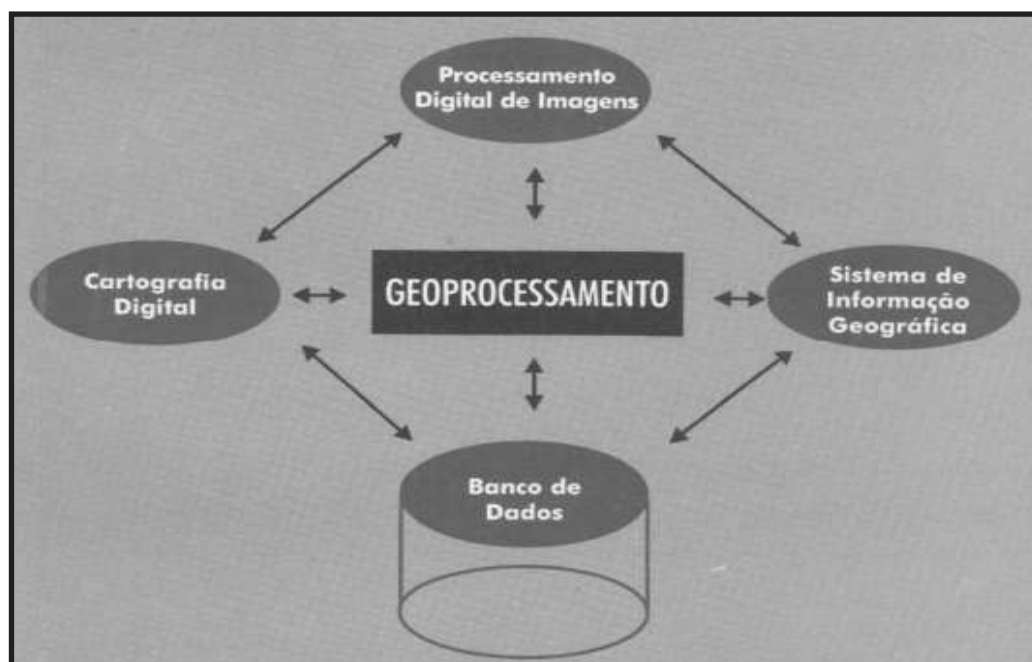
Geoprocessamento

O geoprocessamento é um conjunto diversificado de técnicas utilizadas na coleta, armazenamento, processamento, análise e representação de dados com referência espacial, ou seja, que podem ser georreferenciados.

Essas técnicas abrangem desde métodos tradicionais de Topografia, que utilizam equipamentos simples como trenas e bússolas, até o emprego de tecnologias avançadas, como satélites de posicionamento global e sensoriamento remoto (VETTORAZI, 1996).

Rosa (2013) divide o geoprocessamento em 4 áreas principais (Figura 6):

Figura 6. Principais atividades envolvidas em Geoprocessamento



Fonte: Rosa (2013).

Segundo Rosa (2013), a cartografia digital possibilita a criação, atualização e utilização de mapas digitais. Essa evolução da cartografia tradicional permite maior precisão na representação gráfica dos dados geográficos e facilita a integração de informações georreferenciadas. O banco de dados é responsável pelo armazenamento de grandes volumes de informações geográficas e não geográficas, o que permite um acesso e organização eficientes. Esses bancos possibilitam consultas e análises rápidas, que servem de suporte para diversas aplicações.

O processamento digital de imagens foca na interpretação e análise de imagens ob-

tidas por satélites ou outros sensores remotos. Essa etapa é essencial para corrigir imperfeições, destacar informações específicas e gerar representações que auxiliam nas análises espaciais. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) representa o núcleo do geoprocessamento. Ele integra dados geográficos com ferramentas analíticas, permitindo análises espaciais avançadas e suportando o planejamento, a gestão de recursos e a tomada de decisão. O SIG oferece uma plataforma robusta para a análise integrada de dados espaciais, essencial para aplicações como gestão ambiental, planejamento urbano e estudos de suscetibilidade a deslizamentos.

Segundo Costa (2023), a maioria das atividades relacionadas ao geoprocessamento são realizadas por Sistemas de Informações Geográficas (SIG), cujo propósito é o processamento de informações espaciais. Esses sistemas têm a capacidade de criar representações digitais do mundo real, gerenciar e armazenar dados de forma eficiente, além de identificar as relações mais adequadas entre variáveis espaciais. Ademais, os SIGs possibilitam a geração de relatórios e mapas que facilitam a compreensão e análise dos resultados.

Câmara e Ortiz (1998) sintetizam que as principais funcionalidades dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) incluem:

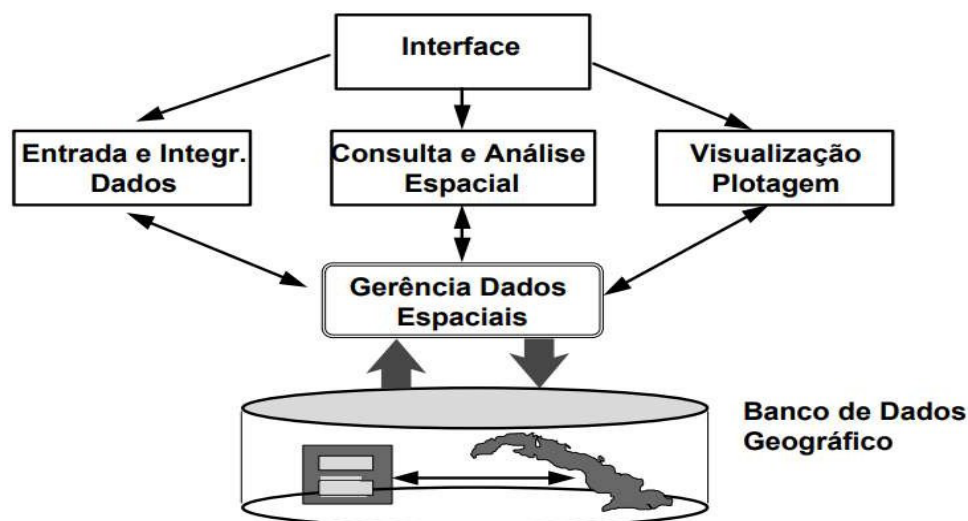
- A integração, em uma única base de dados, de informações espaciais oriundas de diversas fontes, como dados cartográficos, censitários, imagens de satélite, redes e modelos digitais de terreno;
- A combinação dessas informações por meio de algoritmos de manipulação, resultando na geração de mapas derivados.

De acordo com Davis e Câmara (2001), a estrutura básica de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) inclui componentes como:

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de consulta e análise espacial;
- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

Esses componentes estão ilustrados na Figura 7:

Figura 7. Estrutura Geral de um SIG



Fonte: Davis e Câmara (2001).

Pimenta *et al.* (2019) afirmam que os SIGs possuem uma ampla diversidade de aplicações, que se estendem por diversos campos do conhecimento e setores da sociedade. Essa versatilidade se deve à capacidade dos SIGs de integrar, analisar e visualizar dados espaciais de diferentes fontes, proporcionando uma compreensão mais profunda dos fenômenos geográficos e auxiliando na tomada de decisões.

No estudo da autora, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a aplicabilidade do SIG na tomada de decisão envolvendo múltiplas variáveis. A revisão foi realizada com artigos com objetivos e áreas diferentes, publicados nos últimos 10 anos. Alguns exemplos dos artigos que foram analisados são:

- Planejamento para construções de estações de incêndio na china;
- Análise de riscos de deslizamento de terra na Turquia;
- Potencial de desenvolvimento da agricultura orgânica para melhoria econômica na Índia;
- Delimitação de zonas e seus potenciais para exploração de águas subterrâneas de modo sustentável no sudeste asiático.

Método AHP

De acordo com Souza (2008), a análise multicritério é uma metodologia empregada no processo de tomada de decisão, que combina e avalia múltiplas variáveis ou critérios utilizando diferentes abordagens. Seu principal propósito é estabelecer uma ordem de prioridade entre as alternativas ou opções disponíveis para a solução de um determinado problema.

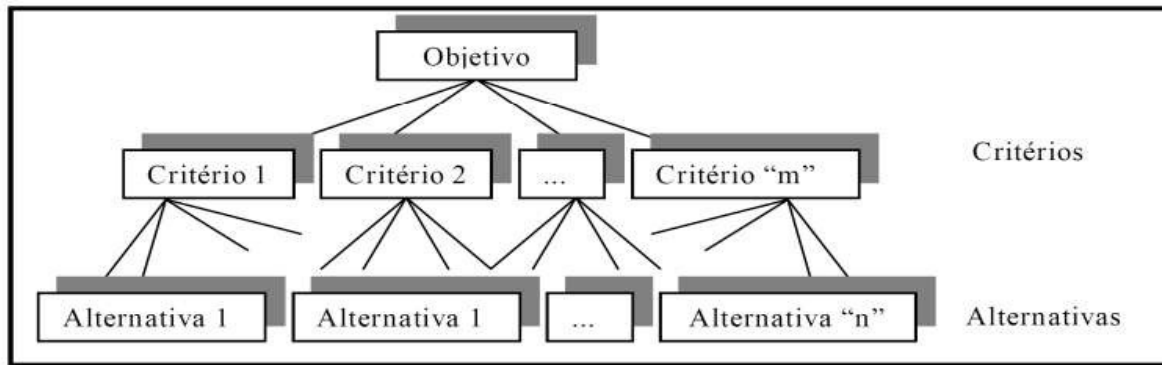
A análise multicritério é uma ferramenta que apoia o processo de tomada de decisão em problemas que envolvem múltiplos objetivos a serem alcançados simultaneamente. Esse processo é organizado em cinco etapas principais. Definição de alternativas, definição de critérios relevantes, avaliação das alternativas, avaliação da importância de cada critério, determinação da avaliação global de cada alternativa (SOUZA, 2008).

Um dos mais conhecidos métodos de avaliação multicritério é o método AHP (Analytic Hierarchy Process), desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, é amplamente reconhecido como uma das ferramentas mais importantes para a análise multicritério. Sua função é oferecer uma abordagem estruturada e sistemática para a tomada de decisões em cenários complexos que envolvem múltiplos critérios (SOUZA, 2008).

O princípio desse método é a decomposição de um determinado problema em fatores menores. Esses fatores podem ser divididos ainda mais em subfatores até se tornarem claros, mensuráveis e relacionáveis, permitindo assim uma síntese final dos resultados (MARINS, 2009).

Segundo Costa (2002), o método é dividido em três partes principais. A primeira é a construção de hierarquias, em que o problema é estruturado em níveis hierárquicos, o que facilita a sua compreensão. O primeiro nível da hierarquia representa o objetivo geral do problema, o segundo nível abrange os critérios, e o terceiro inclui as alternativas. Dessa forma, a visualização do sistema como um todo se torna mais simples. A Figura 8 mostra a estrutura hierárquica do método AHP.

Figura 8. Estrutura Hierárquica AHP



Fonte: Marins (2009).

A segunda etapa consiste em comparar par a par os elementos de um nível hierárquico em relação a cada elemento vinculado a um nível superior, construindo as matrizes de julgamento. A escala numérica de comparação está apresentada na Figura 9 abaixo:

Figura 9. Escala numérica de Saaty

Escala numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos elemento são de igual importância.	Ambos elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões.
Incremento 0.1	Valores intermediários na graduação mais fina de 0.1.	Usados para graduações mais finas das opiniões.

Fonte: Roche (2004).

O terceiro estágio corresponde à priorização das alternativas e à definição final das classificações. Nesta etapa, os pesos obtidos na matriz de comparação são utilizados para avaliar as alternativas, o que irá fornecer uma base sólida para a tomada de decisão.

4

ASPECTOS METODOLÓGICOS



MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi estruturada em duas etapas principais: a coleta e organização de dados relevantes para a análise de áreas de risco de deslizamento em Belo Horizonte e a aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP), integrado a ferramentas de geoprocessamento, para a identificação das áreas com maior risco de deslizamento na cidade.

Área de Estudo

A área estudada é a cidade de Belo Horizonte, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Conforme o censo do IBGE de 2022, Belo Horizonte conta com 2.315.560 habitantes, sendo o sexto município mais populoso do Brasil, o terceiro da Região Sudeste e o mais populoso de Minas Gerais. Com uma extensão territorial de cerca de 331 km², sua geografia é caracterizada por uma combinação de morros e áreas mais planas. Além disso, a cidade apresenta uma topografia marcada por encostas e regiões de alta declividade (IBGE, 2022).

Coleta de Dados

Foram levantadas as bases de dados geográficas necessárias para o estudo, além de serem consultadas referências bibliográficas relacionadas ao tema. Os dados coletados passaram por etapas de normalização das informações, vetorização e conversão vetor/raster. Para a análise espacial e a criação dos mapas temáticos, utilizou-se o software QGIS 3.34.13, que possibilitou integrar e trabalhar com os dados de forma eficiente.

Mapas Temáticos

Os mapas temáticos gerados neste trabalho foram elaborados com base na análise multicritério. Eles foram criados com o objetivo de identificar e classificar áreas de maior risco de deslizamento em Belo Horizonte, considerando diferentes fatores geográficos, geológicos e climáticos. A construção dos mapas seguiu as seguintes etapas principais: levantamento de dados, processamento dos critérios no ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) e análise hierárquica para priorização das áreas de risco.

Os critérios utilizados para a geração dos mapas estão representados na Tabela 1 e foram: declividade, uso e ocupação do solo, geologia (genética), geologia (litotipo) e pluviosidade.

Esses critérios foram retirados do estudo realizado pelo IBGE em 2019 denominado “Susceptibilidade a deslizamentos no Brasil: primeira aproximação”.

Tabela 1. Critérios para Avaliação

Critérios de Avaliação	C1 - Declividade
	C2 - Geologia (Genética)
	C3 - Uso do Solo
	C4 - Pluviosidade
	C5 - Geologia (Litotipo)

Fonte: Os Autores (2025)



Para cada critério, os dados foram obtidos de fontes confiáveis e processados de forma específica. O processamento da declividade foi realizado utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) de 30 metros de resolução, disponibilizado pelo Copernicus DEM, uma base confiável utilizada em estudos geoespaciais. Após a obtenção do MDE, o cálculo da declividade foi realizado no software QGIS utilizando a ferramenta Declividade, que gera uma camada raster representando as inclinações do terreno.

Com os valores de declividade obtidos, foi aplicada a classificação baseada no sistema da (EMBRAPA, 1999), que categoriza as inclinações do terreno em diferentes classes. Áreas com declividade entre 0% e 3% foram classificadas como Classe 1, enquanto aquelas entre 3% e 8% foram enquadradas na Classe 2. Já as áreas com declividade de 8% a 20% pertencem à Classe 3, e aquelas entre 20% e 45% foram designadas como Classe 4. Para declividades entre 45% e 75%, foi atribuída a Classe 5, enquanto as áreas com mais de 75% de declividade foram classificadas como Classe 6. Posteriormente, os valores de declividade foram normalizados em uma escala de 0 a 1, de forma a padronizar os dados e integrá-los aos demais critérios utilizados na análise multicritério. A normalização foi realizada utilizando a calculadora raster do QGIS.

Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos a partir da coleção de 2023 dos mapas de uso e ocupação do solo do MapBiomas (MAPBIOMAS, 2023).

Os dados de geologia foram divididos em duas categorias: genética e litotipo. Para ambos os critérios, as informações foram obtidas do mapeamento geológico disponível no IDE-SISEMA.

O critério de pluviosidade foi baseado no Mapa da Precipitação Média Anual do Estado de Minas Gerais, disponível no IDE-SISEMA. Este mapa foi elaborado a partir da interpolação dos dados das normais climatológicas de 1961-1990. A escolha desse período se deve à sua representatividade e ao fato de que estudos mais recentes não indicaram alterações climáticas e pluviométricas significativas.

Depois de obter os rasters e vetores correspondentes a cada critério, eles foram georreferenciados no sistema de coordenadas adequado. O sistema de coordenadas escolhido foi o SIRGAS 2000 UTM 23S.

Em seguida, foi necessário atribuir uma nota de risco de deslizamento para cada uma das classes. As notas foram definidas em uma escala de 0 a 1, aplicadas a todas as classes dentro dos critérios analisados. A atribuição dessas notas foi fundamentada no estudo “Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil - Primeira Aproximação”, realizado pelo IBGE em 2019. Além disso, foram considerados os seguintes aspectos:

- Declividade: áreas com maior inclinação apresentam maior risco de deslizamento devido à instabilidade do solo e ao aumento do escoamento superficial durante chuvas intensas. Terrenos mais planos foram classificados com notas mais baixas e áreas de alta declividade receberam notas mais elevadas devido ao seu potencial de instabilidade;
- Uso e ocupação do solo: áreas urbanizadas e impermeabilizadas apresentam maior risco de deslizamento devido à redução na capacidade de infiltração do solo e ao aumento da pressão sobre o terreno. Áreas com uma maior quantidade de vegetação natural foram classificadas com notas mais baixas, pois apresentam maior capacidade de absorção e estabilização do solo;
- Genética das rochas: as características genéticas das rochas influenciam diretamente na estabilidade do terreno. Rochas menos coesas e mais frágeis estruturalmente foram classificadas com notas mais altas, representando maior risco;

- Litotipo: O tipo de rocha é um fator importante para a determinação do risco. Um exemplo são as formações ígneas, que são mais resistentes e, devido a isso, receberam notas mais baixas;
- Pluviosidade: a quantidade de precipitação exerce influência direta no aumento da suscetibilidade a deslizamentos. Áreas com altos índices pluviométricos apresentam maior risco devido à saturação do solo e ao aumento da pressão por água, o que pode desencadear movimentos de massa.

Os critérios analisados para este estudo foram avaliados utilizando uma escala de 0 a 1, onde as notas representam o grau de risco de deslizamento associado a cada classe. A nota 0 foi atribuída às áreas consideradas de menor risco ou sem potencial para deslizamentos, enquanto a nota 1 indicou as áreas com maior suscetibilidade. A Tabela 2 apresenta as notas atribuídas a cada classe dos critérios analisados:

Tabela 2. Classes e notas dos critérios adotados

Critério de Avaliação	Classe	Nota
Declividade	0 a 3	0,1
	3 a 8	0,2
	8 a 20	0,4
	20 a 45	0,6
	45 a 75	0,8
	75 a 90	1,0
Uso e Ocupação do Solo	Vegetação Florestal	0,1
	Vegetação Campestre	0,2
	Vegetação Campestre/Área Úmida	0,2
	Pastagem com Manejo	0,8
	Mosaico de Ocupações	0,6
	Área Urbana	1,0
	Área Descoberta	0,5
	Área Artificial	1,0
	Área Agrícola	0,5
	Água	0,0
Genética	Metamorfismo regional	0,6
	Metamorfismo regional, Química	0,6
	Plutônica	0,2
Litotipo	Filito	0,7
	Filito, Xisto, Dolomito	0,5
	Gnaisse	0,3
	Granito	0,1
	Filito, Xisto, Metagrauvaca	0,5
	Itabirito, Dolomito	0,7

Fonte: Os Autores (2025)

Método AHP

Para aplicar a análise multicritério, foi utilizado o método AHP (Analytic Hierarchy Process). O método foi desenvolvido para realizar combinações de variáveis de forma pareada, proporcionando maior clareza no processo de tomada de decisão. Inicialmente, os critérios foram estruturados em uma hierarquia, considerando o grau de influência de cada critério na ocorrência de deslizamentos.

Após esse processo, uma matriz foi construída seguindo o método de Saaty (1991). Trata-se de uma matriz de julgamento cujo objetivo é avaliar e priorizar todos os critérios analisados. Essas matrizes são elaboradas a partir de comparações pareadas entre os critérios, utilizando a escala de Saaty, que varia de 1 (importância igual) a 9 (importância extrema de um critério em relação ao outro). A Tabela 3 exemplifica a construção de uma matriz de julgamento:

Tabela 3. Matriz de julgamento genérica

	Critério A	Critério B	Critério C	Critério D
Critério A	1	2	3	5
Critério B	1/2	1	2	4
Critério C	1/3	1/2	1	3
Critério D	1/5	1/4	1/3	1

Fonte: Adaptado de Saaty (1999)

A Tabela 4 apresenta a matriz de julgamentos elaborada para a avaliação dos critérios no presente estudo:

Tabela 4. Matriz de julgamento dos critérios de risco de deslizamento

	Declividade	Uso do Solo	Genética	Litotipo	Pluviosidade
Declividade	1	3	5	7	9
Uso do Solo	0,333	1	3	5	7
Genética	0,200	0,333	1	3	5
Litotipo	0,143	0,200	0,333	1	3
Pluviosidade	0,111	0,143	0,200	0,333	1

Fonte: Os Autores (2025)

A diagonal principal da matriz apresenta sempre o valor 1, pois um critério comparado a si mesmo tem importância equivalente. Os valores recíprocos, como 1/3 ou 0,333, indicam o inverso de um julgamento, o que mostra que um critério é menos importante em relação a outro.

Após isso, foi elaborada uma nova matriz, denominada matriz dividida. Ela foi construída dividindo os valores de cada célula da matriz de julgamento pela soma da respectiva coluna. A Matriz dividida está representada na Tabela 5.

Tabela 5. Matriz Dividida

	Declividade	Uso do Solo	Genética	Litotipo	Pluviosidade
Declividade	0,560	0,642	0,524	0,429	0,360
Uso do Solo	0,186	0,214	0,315	0,306	0,280
Genética	0,112	0,071	0,105	0,184	0,200
Litotipo	0,080	0,043	0,035	0,061	0,120
Pluviosidade	0,062	0,031	0,021	0,020	0,040

Fonte: Os Autores (2025)

Esse processo foi essencial para atribuir uma importância relativa a cada critério analisado, permitindo que fossem ponderados de forma adequada na geração dos mapas temáticos e na avaliação do risco de deslizamento.

Após essa etapa, é necessário verificar a consistência dos julgamentos realizados. Para isso, calcula-se a Razão de Consistência (RC), que deve ser inferior a 0,1 para que os resultados sejam considerados válidos. O cálculo da RC é realizado por meio da Equação 4.1.

$$RC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1) \times IR} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Em que: λ_{max} = autovvalor da matriz; n = Ordem da matriz; IR = Índice Randômico

O Índice Randômico (IR) é obtido a partir de uma tabela de valores que corresponde a matrizes quadradas de ordem n, conforme as diretrizes apresentadas por Saaty (1991) (Tabela 6).

Tabela 6. Índices Randômicos - IR

Ordem da Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Após a verificação da Razão de Consistência (RC) e a obtenção dos pesos atribuídos a cada critério, foram gerados os mapas temáticos que apresentam as áreas de Belo Horizonte com maior risco de deslizamentos.

5

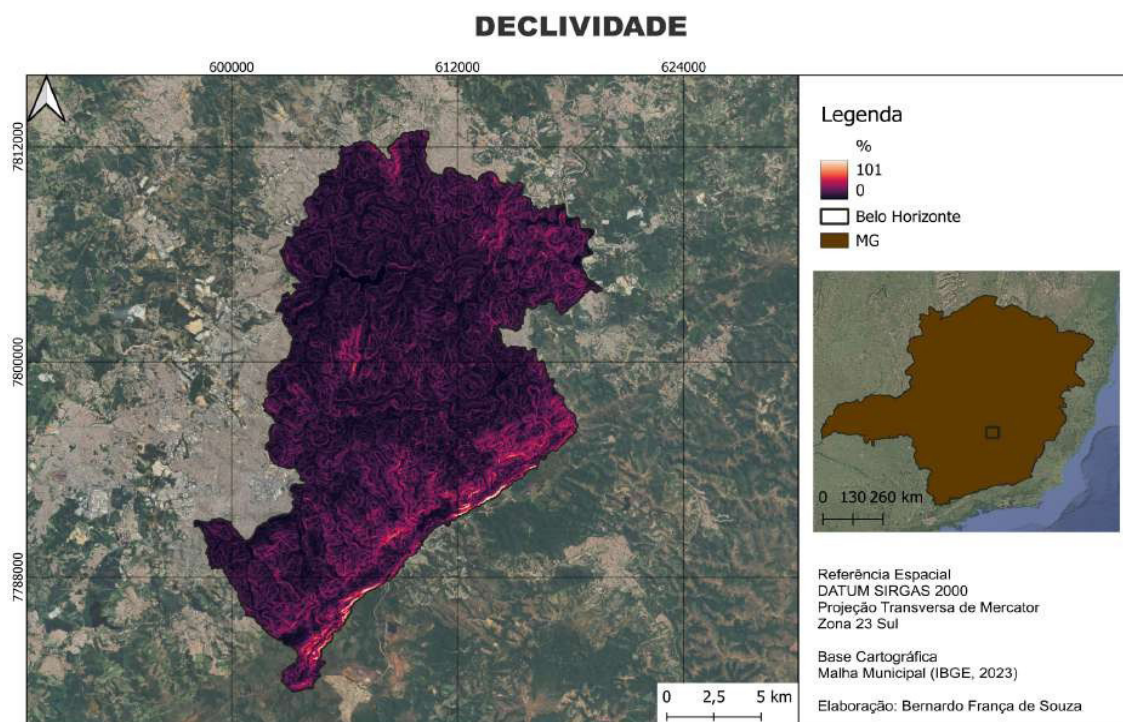
RESULTADOS E DISCUSSÃO



Mapas dos critérios

Os mapas temáticos gerados para cada critério foram analisados de forma individual e posteriormente combinados. O objetivo foi identificar as regiões com maior suscetibilidade a deslizamentos de terra, considerando as características geográficas e climáticas de Belo Horizonte. A Figura 10 mostra o mapa de declividade de Belo Horizonte e a Figura 11 mostra o mapa de uso e ocupação do solo em Belo Horizonte.

Figura 10. Mapa de declividade em Belo Horizonte.

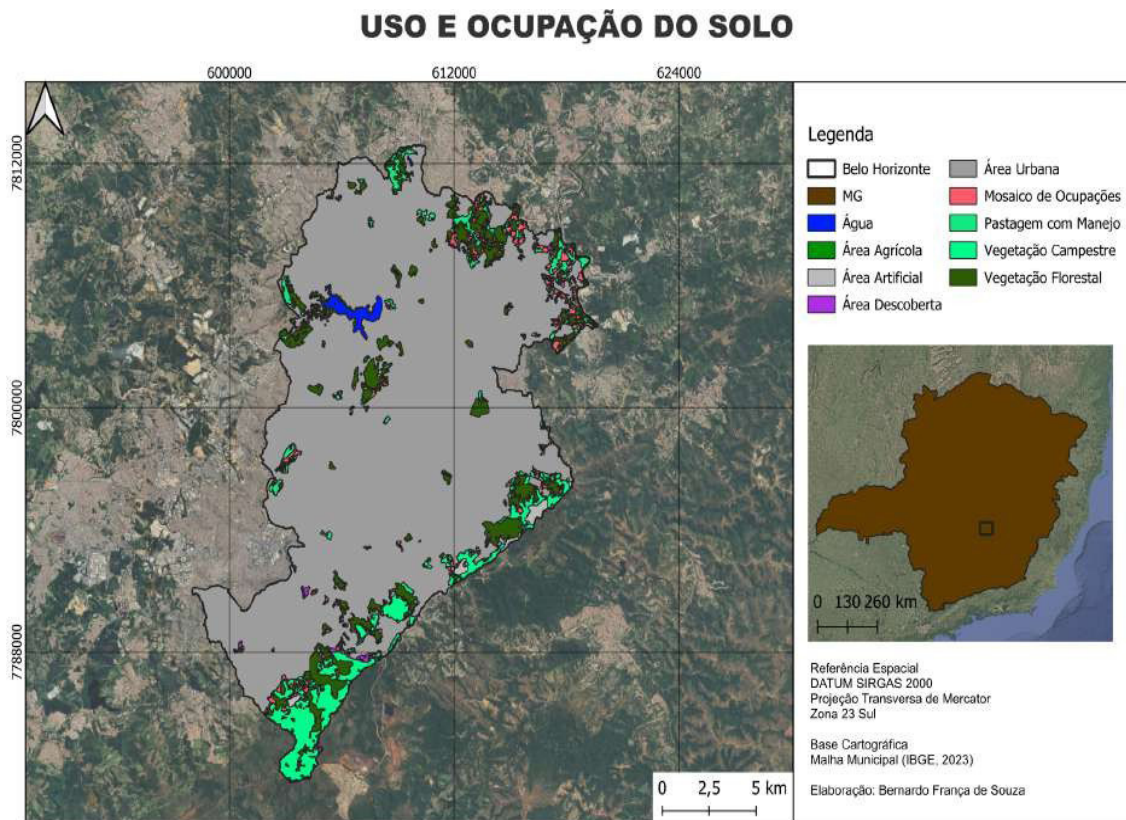


Fonte: Os Autores (2025)

Este mapa (Figura 10) demonstra a inclinação do terreno em Belo Horizonte. As áreas que apresentam maior declividade são as áreas formadas a partir dos dobramentos. Em Belo Horizonte, essas áreas estão concentradas na Serra do Curral.

O mapa (Figura 11) indica como o solo é utilizado em Belo Horizonte, mostrando áreas de vegetação, áreas urbanas e outros tipos de ocupação. As áreas com uso e ocupação mais intensos, como áreas urbanas adensadas, apresentam maior risco de deslizamento devido à impermeabilização do solo e à alteração da drenagem natural.

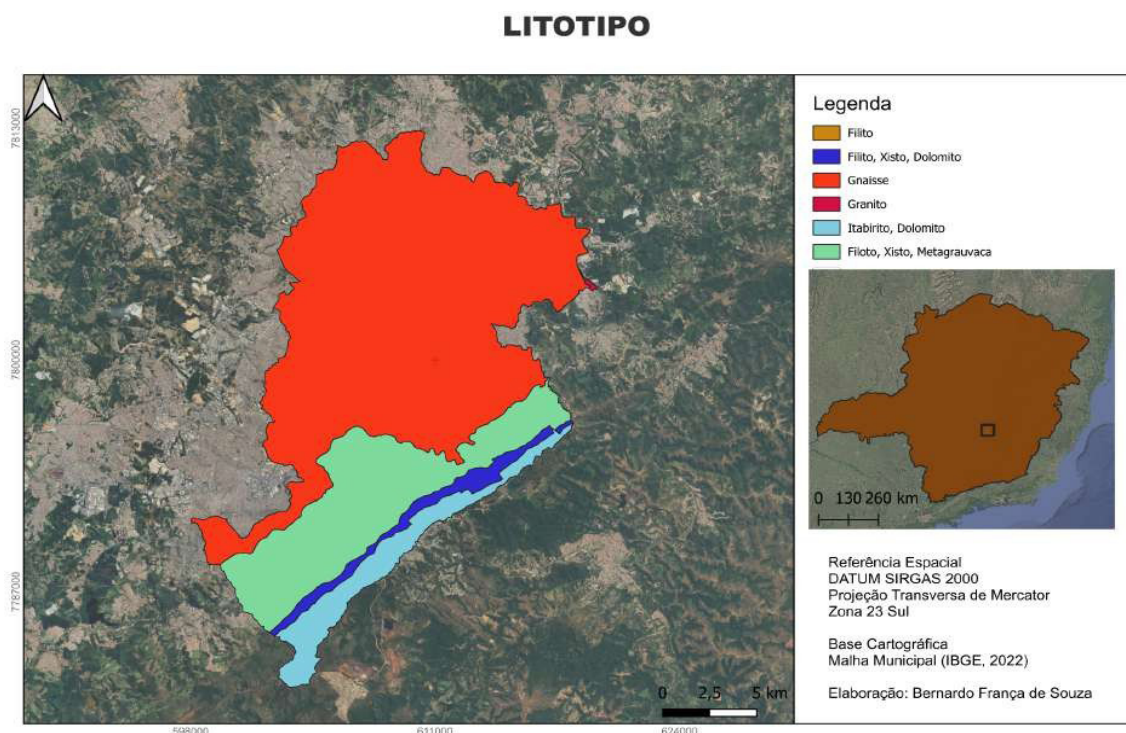
Figura 11. Mapa de uso e ocupação do solo em Belo Horizonte.



Fonte: Os Autores (2025)

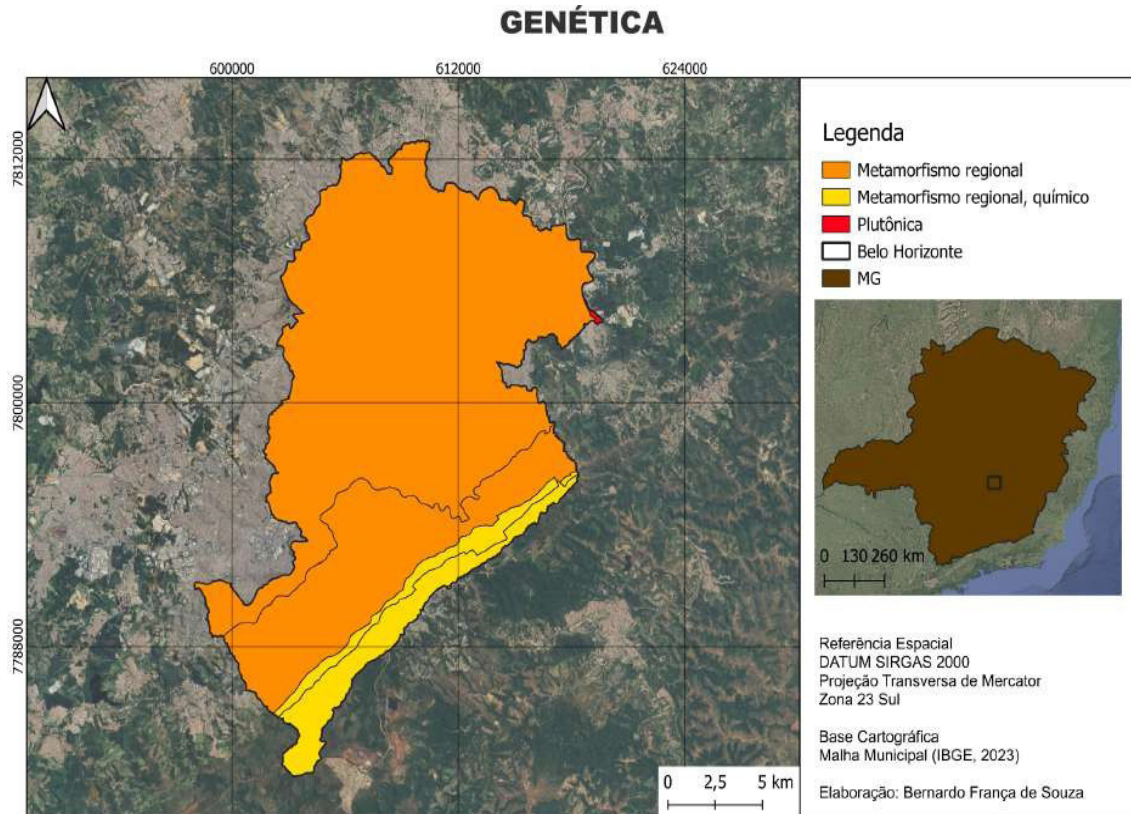
As Figuras 12 e 13 apresentam as características geológicas de Belo Horizonte. A Figura 5.3 mostra características relacionadas ao litotipo, enquanto a Figura 5.4 mostra características relacionadas à genética.

Figura 12. Mapa do litotipo de Belo Horizonte.



Fonte: Os Autores (2025)

Figura 13. Mapa de genética de Belo Horizonte.

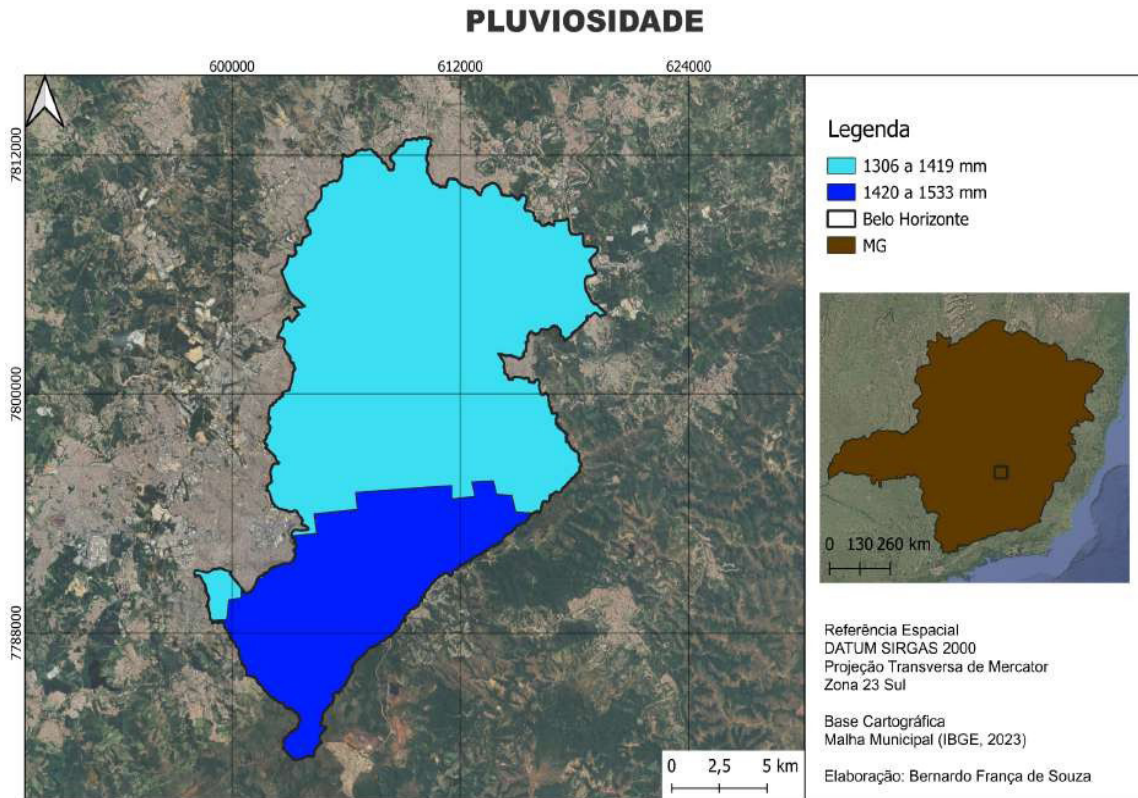


Fonte: Os Autores (2025)

O mapa de litotipo de Belo Horizonte (Figura 12) apresenta as formações rochosas na região, onde as áreas formadas por filitos e xistos, pertencentes aos Grupos Sabará e Piracicaba, são mais suscetíveis a deslizamentos devido à sua menor resistência mecânica e maior suscetibilidade ao intemperismo. O Complexo Belo Horizonte, composto principalmente por gnaisses, é mais resistente aos deslizamentos. Já a Figura 13 mostra as características genéticas das rochas, que influenciam a estabilidade do terreno. As áreas com rochas que sofreram metamorfismo regional apresentam maior risco de deslizamento, pois essas rochas tendem a ser mais frágeis estruturalmente.

A Figura 14 mostra o mapa de pluviosidade de Belo Horizonte.

Figura 14. Mapa de pluviosidade de Belo Horizonte.



Fonte: Os Autores (2025)

Após a análise de cada critério por meio do método AHP, foi possível atribuir pesos a cada um deles. Os valores desses pesos estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7. Pesos dos critérios

Crítérios	Pesos
Declividade	0,503
Uso do Solo	0,260
Genética	0,134
Litotipo	0,068
Pluviosidade	0,035

Fonte: Os Autores (2025)

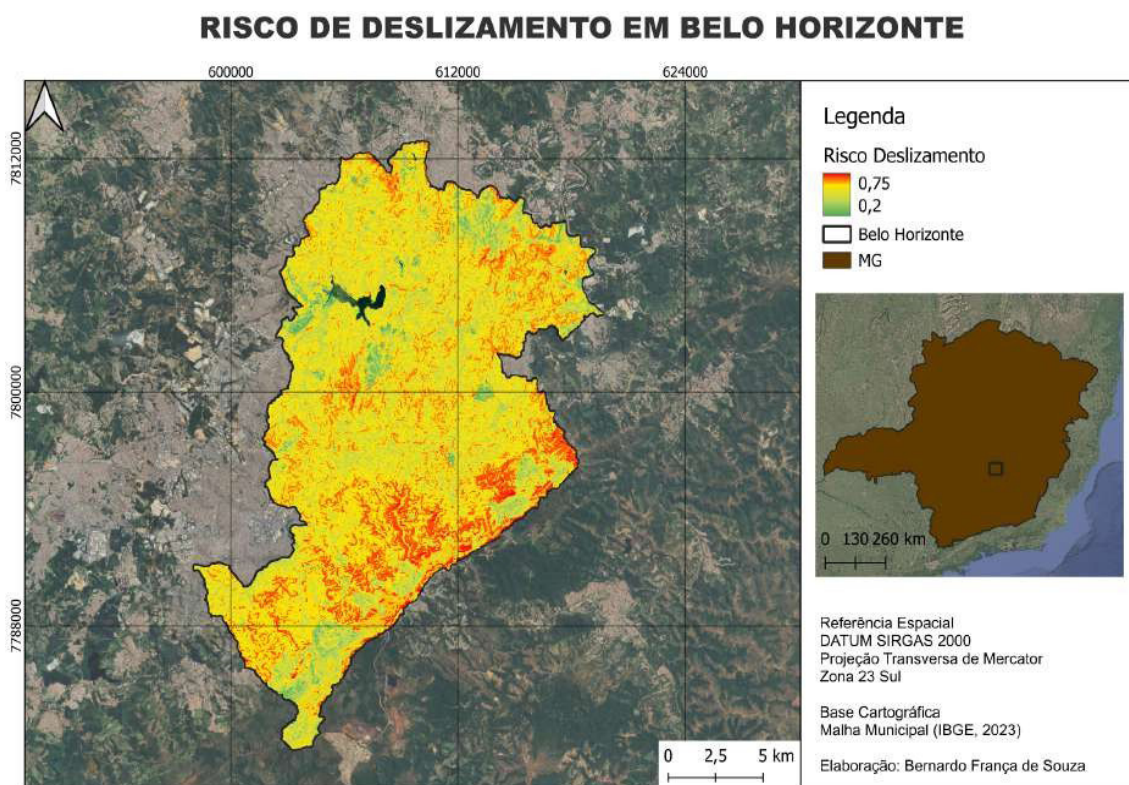
A Razão de Consistência (RC) também foi obtida e seu valor foi de 0,053. Esse valor foi menor que 0,1, então está dentro do limite aceitável segundo os critérios estabelecidos por Saaty (1991). Isso significa que os julgamentos realizados apresentam consistência suficiente para que os pesos atribuídos aos critérios sejam confiáveis e possam ser utilizados na análise multicritério.

Com os valores dos pesos e a RC verificada, os pesos foram integrados em uma operação na calculadora raster do QGIS, utilizando uma resolução espacial de 30 metros. Isso significa que cada pixel da imagem raster corresponde a um quadrado que representa uma área de 30 metros por 30 metros na realidade.

Para cada pixel, foi realizada a soma das notas de cada critério, multiplicadas pelo respectivo peso. Assim, foi possível gerar o produto cartográfico, no qual os maiores valores

indicam um maior risco de deslizamento. O mapa com esse resultado está representado na Figura 15.

Figura 15. Mapa de risco de deslizamento de Belo Horizonte.



Fonte: Os Autores (2025)

Esse mapa com o resultado final permite identificar as regiões com maior risco de deslizamento, facilitando o planejamento e a gestão de riscos. A declividade é um dos principais indicativos de risco em uma determinada região, pois terrenos com inclinações mais acentuadas possuem maior potencial para instabilidades.

Em relação aos fatores geológicos, as formações compostas por filitos e xistos, característicos do Grupo Sabará e do Grupo Piracicaba, estão mais associadas a áreas de alto risco devido à sua menor resistência mecânica e maior suscetibilidade ao intemperismo.

Além disso, o uso e ocupação do solo desempenham um papel determinante na suscetibilidade, com áreas urbanizadas ou desmatadas apresentando maior risco devido à impermeabilização e à redução da capacidade de infiltração do solo. A pluviosidade, representada pelo índice pluviométrico médio anual, foi considerada um elemento desencadeador dos deslizamentos, já que chuvas persistentes são um dos principais gatilhos para deslizamentos em regiões instáveis.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS



 trabalho utilizou técnicas de geoprocessamento e análise multicritério, por meio do método AHP, para identificar áreas com maior suscetibilidade a deslizamentos em Belo Horizonte. A aplicação do método AHP possibilitou a combinação de diversos fatores para a identificação dessas áreas. Os fatores considerados foram: litologia, declividade, pluviosidade, uso e cobertura do solo, e características genéticas, o que permitiu uma análise espacial robusta.

A definição de pesos através do método AHP indicou que os principais fatores condicionantes para a ocorrência de deslizamentos na região são a declividade elevada, a presença de características geológicas menos coesas, além de áreas com uso do solo mais urbanizado.

A utilização do método AHP demonstrou-se eficaz para hierarquizar e ponderar os critérios analisados. Os mapas gerados oferecem uma ferramenta de análise inicial valiosa para o planejamento urbano e para a gestão territorial.

Porém, o método AHP também apresenta uma característica subjetiva, ou seja, a atribuição de notas e a definição da ordem de importância entre os fatores podem variar de autor para autor, dependendo do contexto e dos objetivos da análise. Dessa forma, é importante ressaltar que os resultados gerados pelo método podem variar, influenciados pelas decisões tomadas durante o processo de hierarquização e ponderação.

7

PERSPECTIVAS FUTURAS



A continuidade dos estudos sobre a suscetibilidade a deslizamentos na região de Belo Horizonte requer um aprofundamento nas características específicas do território. Fatores como a diversidade geológica, as variações microclimáticas, o padrão de uso e ocupação do solo e a presença de construções em áreas de risco podem apresentar comportamentos únicos que afetam diretamente a precisão dos modelos de análise, como o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Nesse contexto, recomenda-se a realização de pesquisas complementares que contemplem a heterogeneidade local e permitam o refinamento dos pesos atribuídos aos critérios considerados no modelo. A interação entre os fatores naturais e antrópicos deve ser analisada de forma integrada, buscando representar com maior fidelidade a dinâmica dos processos que favorecem os deslizamentos.

Além disso, estudos mais específicos poderão avaliar a influência de variáveis que não foram incluídas nesta abordagem inicial, mas que podem exercer papel significativo na definição das zonas de risco. Exemplos incluem a compactação do solo, sistemas de drenagem precários, intervenções urbanas recentes e a presença de vegetação nativa ou exótica.

O livro *Belo Horizonte em Alerta: Identificação de Zonas Críticas de Deslizamento com Técnicas de Geoprocessamento* serve como base importante para guiar futuras investigações. A obra contribui com uma análise detalhada da aplicação de técnicas de geoprocessamento no mapeamento de áreas críticas, reforçando a necessidade de metodologias cada vez mais precisas e adaptadas à realidade local.

Nesse sentido, a incorporação de dados atualizados e o uso de tecnologias emergentes, como sensores remotos de alta resolução e inteligência artificial, também se configuram como caminhos promissores para ampliar a eficiência dos sistemas de alerta e apoiar a tomada de decisão por parte do poder público.

REFERÊNCIAS

- ABRANCHES, Mônica. Planejamento urbano em Belo Horizonte: análise da atuação dos conselhos municipais na gestão da cidade. **Cadernos Metrópole**, v. 11, n. 22, p. 495-517, 2009.
- ANAC. **Metodologia de cálculo AHP**. [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/Anexo3MetodologiaDecalculoAHP>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- ASSIS, Laís Emily; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; LIMA, Cleverson Alves; et al. Mapping of Geological-Geotechnical Risk of Mass Movement in an Urban Area in Rio Piracicaba, MG, Brazil. **Soils and Rocks**, v. 43, n. 1, p. 57-70, 2020.
- CÂMARA, Gilberto et al. Introdução à ciência da geoinformação. **São José dos Campos: INPE**, v. 345, 2001.
- CRUDEN, D.M. A simple definition of a landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, n. 43, p. 27-29, 1991.
- DIAS, Fernando Peres; HERRMANN, ML de P. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis-SC. **Caminhos de Geografia**, v. 3, n. 6, p. 57-73, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.
- FARINA, Flávia C. Abordagem sobre as técnicas de geoprocessamento aplicadas ao planejamento e gestão urbana. **Cadernos EBAPE BR**, v. 4, n. 4, p. 01-13, 2006.
- FERNANDA, Daniele; CAROLINA, Ana; BELOTTI, Fernanda Maria. 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**, v. 27, 2020.
- IBGE. **Biblioteca**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- IBGE. **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-horizonte.html>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **O que é Zona de Convergência do Atlântico Sul? Entenda agora!**. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/zona-de-convergencia-do-atlantico-sul-ZCAS#:~:text=A%20Zona%20de%20Converg%C3%Aancia%20do,da%20primavera%20e%20o%20ver%C3%A3o>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- JANNUZZI, P. de M.; MIRANDA, W. L. de; SILVA, D. S. G. da. Análise multicritério e tomada de decisão em políticas públicas: aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações. **Informática Pública**, v. 11, n. 1, p. 69-87, 2009.
- KAYASTHA, Prabin; DHITAL, Megh Raj; DE SMEDT, Florimond. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. **Computers & Geosciences**, v. 52, p. 398-408, 2013.
- KUMAR, Rohan; ANBALAGAN, R. Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri reservoir rim region, Uttarakhand. **Journal of the Geological Society of India**, v. 87, p. 271-286, 2016.
- LUCAS, T. P. B. **Chuvas persistentes e ação da Zona de Convergência do Atlântico Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Tese de Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.
- MAPBIOMAS Brasil. **MapBiomas**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- MARINS, Cristiano Souza; SOUZA, Daniela de Oliveira; BARROS, Magno da Silva. O uso do método

de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. **Xli Sbpo**, v. 1, p. 49, 2009. Disponível em: <https://www.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2009/artigos/55993.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2024.

MAXWELL. **PUC-Rio.br**. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?msg=28>. Acesso em: 15 abr. 2024.

MOREIRA, Z.; LANZA, G. **Trânsito na Avenida Antônio Carlos é desviado após deslizamento de terra no bairro Aparecida, em BH**. *G1*. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/09/transito-na-avenida-antonio-carlos-e-desviado-apos-deslizamento-de-terra-no-bairro-aparecida-em-bh.ghtml>. Acesso em: 18 jan. 2025.

PAOLUCCI, Cindy. **Risco hidrometeorológico no município de Belo Horizonte**: eficiências e deficiências desde 1990. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PARIZZI, Maria Giovana. Riscos geológicos e hidrológicos no município de Belo Horizonte, MG. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 11, 2021.

PIMENTA, Lianne Borja; ELY, Norma; MADALENA, Amanda; et al. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações** (Campo Grande), p. 407–420, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfXjpPR8M/#>. Acesso em: 18 jan. 2025.

QUADRO, Mário Francisco Leal de. Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2-3, p. 210–210, 1999.

REIS, A.C.B.; SCHRAMM, V.C. **Guia para aplicação da análise multicritério em análise de impacto regulatório (AIR) no Inmetro**. 2022. Disponível em <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/regulamentacao/analise-de-impacto-regulatorio/saiba-mais/guia-para-aplicacao-da-analise-multicriterio-em-air-no-inmetro.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2025.

ROSA, Roberto. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do departamento de geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005.

ROSA, Roberto. **Introdução ao geoprocessamento**. 2013. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2016/12/Introducao-ao-Geoprocessamento-Roberto-Rosa.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SANTOS, Marcos; HERMOGENES, Lucas Ramon dos Santos; LIMA, Angélica Rodrigues. Utilização do método AHP para definir o melhor arranjo físico de uma linha de produção em uma indústria metalúrgica no Rio de Janeiro. **Anais do X SIMPROD**, 2018.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Editora Makron, 1991.

SÉRIE TÉCNICA, Ipef; PIRACICABA. **Técnicas de geoprocessamento no monitoramento de áreas florestadas**. v. 29, p. 45–51, 1996. Disponível em: <https://www.ipef.br/PUBLICACOES/stecnica/nr29/cap06.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SILVA, Cristiane; COURI, Leandro. **Parte de uma casa desaba em BH**. 2022. Estado de Minas. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/01/07/interna_gerais,1336024/parte-de-uma-casa-desaba-em-bh.shtml. Acesso em: 18 jan. 2025.

UFMG. **Centro de Censoramento Remoto**. 2025. Disponível em: <https://www.csr.ufmg.br/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

WALD, David J. **USGS Circular 1325**: The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides. *Usgs.gov*. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>. Acesso em: 18 jan. 2025.



ISBN: 978-65-6068-161-3

CDL



9 786560 681613

