



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia  
Ambiental  
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



---

**Comparação entre metodologias heurísticas e bivariadas de análise de  
susceptibilidade a escorregamentos como método de prevenção a desastres naturais  
na mesorregião da Zona da Mata mineira.**

**Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental.**

**Marcelo M. de Figueiredo**

**Ouro Preto  
2021**

**MARCELO MENDONÇA DE FIGUEIREDO**

**Comparação entre metodologias heurísticas e bivariadas de análise de suscetibilidade a escorregamentos como método de prevenção a desastres naturais na mesorregião da Zona da Mata mineira.**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção ao Grau em Engenharia Ambiental.

**Professor orientador:** Doutor César Falcão Barella

**Professora coorientadora:** Doutora Maria Eugênia Silva de Souza

**Ouro Preto, setembro de 2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F475c Figueiredo, Marcelo Mendonça de.

Comparação entre metodologias heurísticas e bivariadas de análise de suscetibilidade a escorregamentos como método de prevenção a desastres naturais na mesorregião da Zona da Mata mineira.

[manuscrito] / Marcelo Mendonça de Figueiredo. - 2021.

57 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. César Falcão Barella.

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Silva de Souza.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Deslizamentos (Geologia). 2. Solo - Uso. 3. Meio ambiente. 4. Modelagem estatística. 5. Processo Hierárquico Analítico. I. Barella, César Falcão. II. Souza, Maria Eugênia Silva de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 504.4:519.24

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas – Colegiado do Curso de  
Engenharia Ambiental – CEAMB

Folha de Aprovação

Marcelo Mendonça de Figueiredo

**COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS HEURÍSTICAS E BIVARIADAS DE ANÁLISE  
DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS COMO MÉTODO DE PREVENÇÃO A  
DESASTRES NATURAIS NA MESORREGIÃO DA ZONA DA MATA MINEIRA.**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 30/09/2021 pela  
comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

César Falcão Barella – DEAMB/UFOP



---

Lucas Leão Pereira – DEGEO/UFOP



---

Cahio Guimarães Seabra Eiras – Doutorando NUGEO/UFOP

*“Just think of the future. And think of your dreams.”*

**H.W.; T.Y.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, Mano e Marildinha, pelo apoio incondicional durante os anos de graduação, sendo uma fonte inesgotável de conselhos, sabedoria e afeto. Vocês são maravilhosos!

Aos meus irmãos, Renato e Bruna, pelo incentivo e por serem exemplos de dedicação e zelo em todos os âmbitos da vida pessoal e profissional. Em tempo, ao Aloísio, meu padrinho, pelas inúmeras aulas e por todo o ensinamento proporcionado.

Agradeço ao meu professor orientador, César Falcão Barella, pela disponibilidade, dedicação e, acima de tudo, por acreditar sempre no meu potencial. Tive orgulho de trabalhar com um profissional de tamanha excelência e espero fazê-lo novamente.

Agradeço à Maria Eugênia, por Toda disponibilidade e Compromisso em me auxiliar, sempre com bom Humor e Entusiasmo, fazendo com que a Coorientação fosse um momento de máximo Aprendizado.

A todos amigos da República Tcheca, meu eterno obrigado, em especial ao Não Acende, por se responsabilizar pela produção de qualidade amplamente duvidosa de todo o café produzido durante a execução do presente.

Por fim, agradeço à ajuda de Isabela, Batuta e Marcella, pelas correções, projeções futuras e infundáveis elocubrações acerca das possibilidades profissionais existentes.

## RESUMO

O aumento da ocorrência de escorregamentos acarreta extensos prejuízos nas esferas sociais, políticas, econômicas e culturais. Estes dados alertam sobre a necessidade de se aprimorar o planejamento do uso e ocupação do solo, especialmente em relação à expansão territorial urbana. Neste contexto, o presente estudo teve por objetivo a elaboração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos, avaliando a acurácia e especificidades dos mesmos, de modo a verificar a exequibilidade de metodologias de baixo custo no contexto da gestão pública de prevenção a escorregamentos e da adequação de municípios à Lei 12.608 de 2012. Para tal, fez-se a análise de inventário de evento com 324 cicatrizes por meio das metodologias de taxa de frequência, também conhecida como *likelihood ratio*, e processo Hierárquico Analítico Multivariado - AHP. A execução destes métodos levou em consideração oito fatores predisponentes de escorregamentos, sendo eles: i) Elevação; ii) Declividade; iii) Litotipos; iv) Distância das linhas de Drenagem; v) Orientação das vertentes; vi) Curvatura plana; vii) Índice Topográfico de umidade e; viii) Distância de eixos rodoviários. Os resultados obtidos foram validados com as técnicas de erro relativo, R-Index e curva ROC. Os métodos foram considerados precisos pelo teste de validação R-Index e obtiveram valores de erro relativo iguais a 0,1136 e 0,2403. Em relação à área abaixo da curva ROC, obteve-se os valores de 0,853 (muito bom) para o método taxa de frequência, 0,746 (bom) para o AHP. Estes dados mostram o desempenho superior do modelo quantitativo da taxa de frequência na predição da ocorrência de escorregamentos e reafirma a viabilidade de sua utilização no contexto da gestão pública de desastres naturais e da adequação de municípios à Lei 12.608 de 2012.

**Palavras chave:** Suscetibilidade, Escorregamentos, Taxa de Frequência, Processo Hierárquico Analítico.

## ABSTRACT

The increase in the occurrence of landslides causes extensive damage in the social, political, economic and cultural spheres. This data alerts about the need to improve the planning of land use and occupation, especially in the urban expansion conjecture. In this context, this study aimed to produce landslide susceptibility maps, evaluating their accuracy and specificities in order to verify the feasibility of low-cost methodologies in the context of public management of natural disaster prevention and adequacy of municipalities to the Law 12.608 of 2012. To this end, an event inventory with 324 scars was analyzed through frequency rate and analytical hierarchical process – AHP. The execution of these methods took into account eight predisposing factors for landslides occurrence, namely: i) Elevation; ii) Slope; iii) Lithotypes; iv) Distance from the Drainage lines; v) Orientation of the slopes; vi) Flat curvature; vii) Topographic Wetness Index and; viii) Distance to roads. The results obtained were validated with the techniques of relative error, R-Index and ROC curve. Both methods were considered accurate by the R-Index method and obtained relative error values equal to 0.1136 and 0.2403. Regarding the area under the ROC curve, values of 0.853 (very good) were obtained for the frequency rate method and 0.746 (good) for the AHP. These data show the superior performance of the quantitative model of the frequency rate in predicting the occurrence of landslides and reaffirms the feasibility of its use in the context of public management of natural disasters and the adequacy of municipalities to Law 12.608 of 2012.

**Key words:** Suscetibility; Landslides; Likelihood Ratio; Analytic Hierarchy Process;



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudo.....	6
Figura 2: Porção do inventário de escorregamentos elaborado por Carvalho (2021). ....	7
Figura 3: Modelo de árvore hierárquica multicritério .....	15
Figura 4: Escala de Saaty para comparação de pares. ....	16
Figura 5: Fluxograma de trabalho aplicado na elaboração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos. ....	25
Figura 6: Panorama dos fatores predisponentes de escorregamentos em estudos de suscetibilidade. ....	26
Figura 7: Mapa de parâmetro de entrada – Hipstometria. ....	27
Figura 8: Mapa de parâmetro de entrada – Declividade.....	28
Figura 9: Mapa de parâmetro de entrada – Curvatura. ....	29
Figura 10: Mapa de parâmetro de entrada – Orientação. ....	29
Figura 11: Mapa de parâmetro de entrada – Índice Topográfico de Umidade.....	30
Figura 12: Mapa de parâmetro de entrada – Litotipos.....	31
Figura 13: Mapa de parâmetro de entrada – Distância de eixos Rodoviários. ....	32
Figura 14: Mapa de parâmetro de entrada – Distância de Linhas de Drenagem.....	32
Figura 15: Grupos de escorregamentos mapeados e divididos em grupos de treino e teste. ....	33
Figura 16: Combinação conceitual de mapas paramétricos. ....	34
Figura 17: Modelo de suscetibilidade a escorregamentos e resultados das validações – Taxa de frequência.....	41
Figura 18: Modelo de suscetibilidade a escorregamentos e resultados das validações – AHP. ....	42
Figura 19: Porcentagem da densidade de escorregamentos por metodologia e categoria empregada.....	43
Figura 20: Curva ROC e AAC para o método taxa de frequência. ....	45
Figura 21: Curva ROC e AAC para o método AHP. ....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Definições de perigo, vulnerabilidade, suscetibilidade, risco e área de risco.	12
Tabela 2: Modelo Conceitual de matriz de comparação par a par.	16
Tabela 3: Índices randômicos de consistência.	17
Tabela 4: Faixas de performance para a Curva ROC.	24
Tabela 5: Valores de Taxa de Frequência obtidos para cada subclasse.	34
Tabela 6: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da declividade.	37
Tabela 7: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Hipsometria.	37
Tabela 9: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Distância das Linhas de Drenagem.	38
Tabela 10: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Distância de Eixos Rodoviários.	38
Tabela 11: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise do Índice Topográfico de Umidade.	39
Tabela 12: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Curvatura	39
Tabela 13: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Orientação.	39
Tabela 14: Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise dos litpotipos.	40
Tabela 15: Validação R-Index e Erro Relativo – Método FR	43
Tabela 16: Validação R-Index e Erro Relativo – Método AHP.	44

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	3
3. OBJETIVO .....	4
4. ÁREA DE ESTUDO .....	6
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	8
5.1 MOVIMENTOS DE MASSA E ESCORREGAMENTOS .....	8
5.2 FATORES PREDISPOONENTES .....	9
5.3 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS .....	10
5.4 SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS .....	12
5.5 METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE .....	13
5.5.1 METODOLOGIAS QUALITATIVAS .....	14
5.5.2 METODOLOGIAS QUANTITATIVAS .....	18
5.6 MAPAS DE SUSCETIBILIDADE .....	22
5.7 VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SUSCETIBILIDADE .....	22
5.7.1 SUCCESS/PREDICTIVE RATE CURVES.....	22
5.7.2 DENSIDADE DE ESCORREGAMENTOS .....	23
5.7.3 ÍNDICE RELATIVO DE DENSIDADE.....	23
5.7.4 ERRO RELATIVO .....	24
5.7.5 CURVA ROC .....	24
6. METODOLOGIA.....	25
6.1 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO .....	25
6.2 DIVISÃO DO INVENTÁRIO .....	32
6.3 MODELAGEM COM TAXA DE FREQUÊNCIA .....	33
6.4 MODELAGEM COM AHP .....	36
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
8. CONCLUSÃO.....	48
9. RECOMENDAÇÕES.....	50
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da ocorrência e intensidade de desastres naturais na última década, mundialmente observado, trouxe a demanda da gestão integrada de riscos, por parte dos governos e da sociedade, através da implementação de ações estruturais e não estruturais. (CEPED/UFSC, 2016). Esse aumento acarreta extensos prejuízos que englobam as esferas sociais, políticas, econômicas e culturais. No entanto, a identificação dos processos e quantificação dos danos associados é, ainda, uma tarefa complexa.

Desastres naturais podem ser compreendidos de diferentes maneiras, de acordo com a variação de suas causas, características e consequências. Embora exista a concepção popular de que o Brasil é um país onde não ocorrem desastres naturais, é recorrente no âmbito nacional inundações e movimentos gravitacionais de massa, com destaque aos escorregamentos e movimentos de massa em vertentes sob a ação da gravidade (FELL *et al.*, 2007; TOMINAGA, 2007). Estes eventos são enquadrados como desastres naturais geológicos e/ou hidrológicos.

Os dados do relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil, elaborado pelo Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, indicam que, de 1995 a 2014, tais eventos geraram ao país prejuízos superiores a R\$ 9 bilhões ao ano. Através da análise de 22.810 registros de desastres naturais, foi possível contabilizar R\$182,7 bilhões de reais em perdas no mesmo período, sendo que 75% deste valor refere-se a prejuízos públicos e privados, enquanto os 25% restantes fazem referência a danos materiais (CEPED/UFSC, 2016).

Além disto, entre os anos 1991 e 2012, foram registrados 669 eventos de movimentos de massa no país, sendo a maioria destes nas regiões sul e sudeste, os quais representaram 93,4% dos casos. No total, as duas regiões contabilizaram 4,35 milhões de afetados, incluindo 529 vítimas fatais e 155 desaparecidos (CEPED/UFSC, 2013). Segundo Eiras (2017), escorregamentos têm maior relação com danos e impactos na esfera social, enquanto enchentes e inundações têm maior ligação com impactos econômicos.

Em resposta a estas ocorrências, em outubro de 2011 foi promulgada a medida provisória nº 547, que instituiu o cadastro nacional de municípios com áreas propícias à ocorrência de escorregamentos de grande impacto ou processos geológicos correlatos (BRASIL, 2011), assegurando melhor direcionamento do capital público na gestão preventiva a desastres naturais. No ano seguinte, a medida provisória foi convertida na Lei 12.608 de 2012, a qual institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC, que impôs aos municípios cadastrados a necessidade de elaboração de cartas geotécnicas (BRASIL, 2012), de modo a certificar caráter técnico ao planejamento urbano e rural, sendo a União incumbida a fornecer, às unidades federativas, o apoio científico necessário na utilização da cartografia geotécnica.

A cartografia geotécnica é um instrumento que visa expor de forma direta e compreensível os processos e características do meio físico (PRANDINI *et al.*, 1992), possibilitando compreender suas potencialidades e limitações para um determinado uso (SOBREIRA e SOUZA, 2012). O produto da cartografia geotécnica varia de acordo com a metodologia e finalidade proposta, gerando cartas geotécnicas de diferentes temáticas.

As cartas geotécnicas compreendem diversos termos e denominações, variando conforme o autor e o contexto de sua utilização, contudo, há certa semelhança conceitual entre elas. De modo geral, são documentos cartográficos que reúnem informações do meio físico e seus processos geodinâmicos, de forma a subsidiar aos gestores e as autoridades na elaboração de políticas públicas, bem como na tomada de decisões referentes ao planejamento urbano. Isto permite que as intervenções no ambiente sejam executadas em consonância com suas limitações geotécnicas (BITAR *et al.*, 2015; COROMINAS *et al.*, 2014).

Nakazawa *et al.* (1991) classificaram as cartas geotécnicas em quatro modalidades. Sendo elas: i) as cartas geotécnicas (por si só), onde esclarecem as diretrizes para o uso e ocupação do solo; ii) as cartas de riscos geológicos, onde se prepondera o dano potencial à ocupação e o uso do meio; iii) as cartas de atributos ou parâmetros, onde são apresentadas informações geográficas pertinentes a ocupação e uso do solo; e por fim, iv) as cartas de suscetibilidade, a qual alude sobre a possibilidade da ocorrência de fenômenos geológicos no meio, incluindo os escorregamentos.

Prandini *et al.* (1992), por sua vez, reiteraram que a carta geotécnica deve ser acessível e compreensível para usuários imperitos, amparando a avaliação dos riscos e

impactos de empreendimentos no meio que os circundam, predeterminando o desempenho da interação entre o uso do solo e o meio físico, minimizando perdas e danos. Ainda, Sobreira e Souza (2012), afirmaram que o produto final das cartas geotécnicas deve conter os processos atuantes no meio, como uso e ocupação do solo, correlacionando informações pertinentes a consolidação do uso urbano e rural.

Neste estudo a cartografia geotécnica foi utilizada como base para a elaboração de duas metodologias, uma qualitativa e uma quantitativa, de análise de suscetibilidade a escorregamentos, denominadas Processo Hierárquico Analítico – AHP e taxa de frequência. Especificamente, estas metodologias se enquadram no contexto da heurística e da estatística bivariada, respectivamente.

A região de estudo selecionada para desenvolvimento das cartas geotécnicas de suscetibilidade foi selecionada com base na pré-existência de um inventário de cicatrizes de evento elaborado por Carvalho (2021), onde foram mapeados 324 escorregamentos dentro de uma área de 900km<sup>2</sup>, a qual engloba por completo o município de Santo Antônio do Grama-MG e parcialmente os municípios circunvizinhos, especialmente a cidade de Jequeri-MG. Desta forma, a modelagem feita neste trabalho complementou o conjunto de informações existentes acerca da ocorrência de escorregamentos da região.

A implementação das metodologias supracitadas foi feita com vistas na avaliação comparativa entre ambas no contexto da gestão integrada de prevenção a desastres naturais, mais precisamente na prevenção a escorregamentos translacionais rasos, principal evento geodinâmico abordado no presente estudo. Desta maneira, espera-se exprimir numericamente o desempenho de cada modelo, ponderando sobre suas particularidades e discorrendo a respeito do rendimento de modelos executados com bases de dados gratuitas, de modo a colaborar com o panorama de adequação da PNPDEC.

## **2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

A suscetibilidade pode ser compreendida como a sensibilidade de um meio às condições e influências externas. No contexto geológico, a suscetibilidade à escorregamentos estima a predisposição de um meio físico em hospedar eventos geodinâmicos que possam alterar suas características. Em outras palavras, trata da propensão à ocorrência de escorregamentos em razão de condições geológicas, notada a

variabilidade espacial destes eventos (VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2009; REICHENBACH *et al.*, 2018; LOMBARDO *et al.*, 2020).

As pesquisas focadas no estudo da suscetibilidade a escorregamentos obtiveram significativo progresso desde os anos 70, onde predominou o emprego de abordagens qualitativas de análise. Ao final da década de 80, surgiram as primeiras avaliações quantitativas de suscetibilidade (REICHENBACH *et al.*, 2018; COROMINAS *et al.*, 2014). O avanço dos sistemas de informações geográficas nas últimas duas décadas promoveu a combinação de estudos de suscetibilidade a escorregamentos com o mapeamento digital e sensoriamento remoto, resultando na possibilidade de geração de múltiplos modelos preditivos, como os estatísticos.

Desta forma, destaca-se a importância da aplicação da cartografia geotécnica e das características informativas de seus produtos finais, servindo como instrumento de apoio a gestores no planejamento do uso e ocupação do solo e possibilitando que entidades governamentais atuem de maneira preventiva em prol de mitigação de impactos decorrentes dos desastres naturais.

Neste sentido, é pertinente avaliar a utilização de diferentes metodologias de análise de suscetibilidade a escorregamentos e, como proposto neste estudo, ponderar sobre o nível de influência da seleção, atribuição de pesos e detalhamento dos fatores causais selecionados para elaboração de modelos preditivos, bem como ponderar sobre o desempenho de cada metodologia empregada para tal, de modo a examinar a viabilidade técnica e financeira de suas aplicações e proporcionar, além do avanço científico da temática de movimentos gravitacionais de massa, maior exequibilidade da adequação de municípios brasileiros à Lei 12.608 de 2012.

### **3. OBJETIVO**

O principal objetivo deste estudo é elaborar mapas de suscetibilidade a escorregamentos combinando os dados existentes na literatura com metodologias qualitativas e quantitativas de análise de suscetibilidade.

Como objetivos específicos, tem-se:

- i) Validar a reprodutibilidade e acuraria destes mapas, os comparando com as demais metodologias comumente utilizadas nestes estudos;

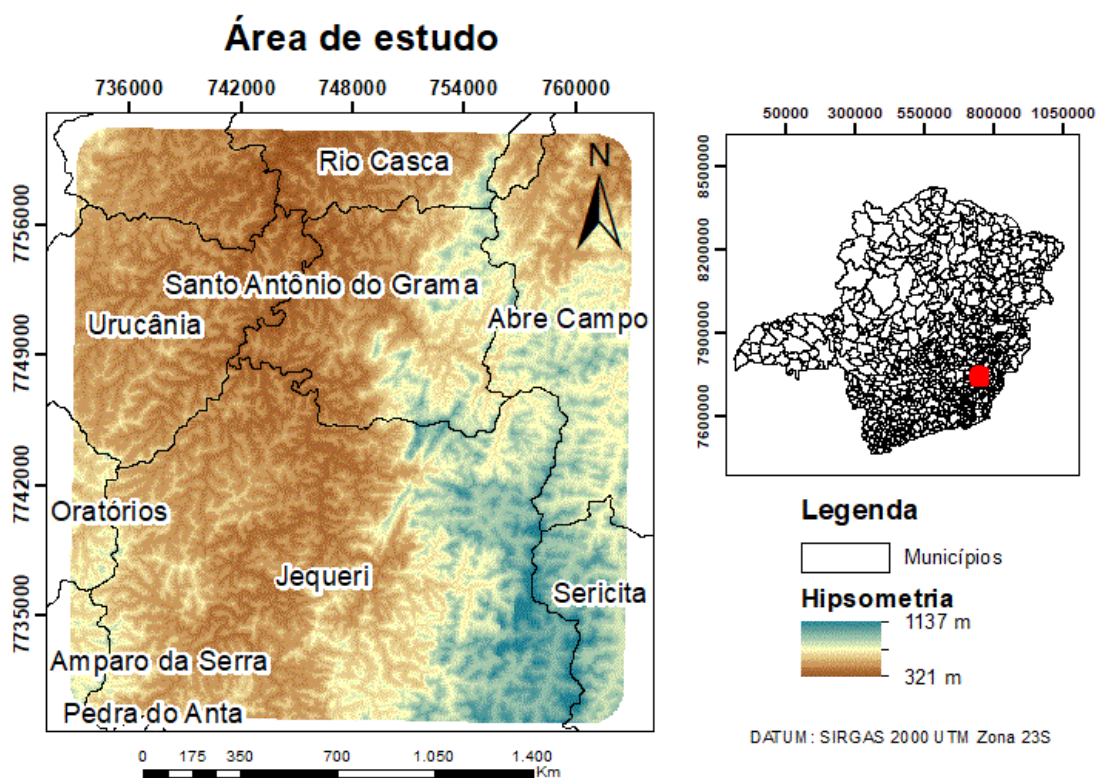
- ii) Ponderar acerca da importância da seleção e do nível de detalhamento dos conjuntos de dados selecionados para desenvolvimento dos modelos preditivos e comparar o desempenho e grau de acurácia das cartas de suscetibilidade geradas por meio das diferentes metodologias utilizadas no estudo.
- iii) Avaliar a possibilidade de elaborar cartas de suscetibilidade através de bancos de dados acessíveis ao poder público, contribuindo com a adequação dos municípios à lei nº 12.608/2012.



#### 4. ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo está localizada na mesorregião da Zona da Mata mineira e na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, entre os municípios de Piedade de Ponte Nova, Rio Casca, São Pedro dos Ferros, Urucânia, Santo Antônio do Grama, Abre Campo, Oratórios, Amparo da Serra, Sericita e Jequeri, sendo os principais acessos através das rodovias MG-262 e MG-329, conforme a Figura 1.

Figura 1: Área de estudo.



Fonte: Elaboração do Autor.

Com cerca de 900 km<sup>2</sup>, a região tem relevo acidentado, predominantemente montanhoso (FIALHO, 2009), com declividade média de 40° e máxima de 79°, elevação média de 729m e máxima de 1137m, enquadrando-se entre os Planaltos do Leste de Minas e a Serra da Mantiqueira Setentrional (QUEIROGA et al., 2011)

A área se enquadra na Folha Jequeri SF.23-X-B-II-4, mapeada na escala 1:50.000 pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, onde destaca-se o domínio das unidades estratigráficas Complexo Mantiqueira e Complexo Juiz de Fora, seguidos pela ampla presença do grupo Andrelândia e do Orto-anfibolito Santo Antônio do Grama.

A escolha desta região para desenvolvimento do estudo decorreu-se da oportunidade de ampliar o uso do inventário de cicatrizes de evento elaborado por Carvalho (2021). O mesmo foi disponibilizado no formato *shapefile*, com 324 escorregamentos mapeados na forma de polígonos, sendo a maioria destes escorregamentos translacionais rasos.

Segundo Carvalho (2021), o inventário de cicatrizes citado foi elaborado através da fotointerpretação das imagens de satélite disponibilizadas pelo software Google Earth Pro, utilizando-se da variação da escala temporal das imagens do acervo disponível na ferramenta. Essa variação se fez necessária devido ao fato de que cicatrizes de eventos mais antigos sofrem alterações visuais com o decorrer do tempo, especialmente em relação à recomposição vegetal da área, fazendo com que as cicatrizes se tornem menos evidentes e dificultando o processo de catalogação dos polígonos das cicatrizes. A Figura 2 mostra uma porção do referido inventário de escorregamentos no ambiente do software Google Earth Pro, com aplicação de exagero vertical para melhor visualização das cicatrizes.

**Figura 2:** Porção do inventário de escorregamentos elaborado por Carvalho (2021).



Fonte: Imagem em 3D de julho de 2018 - Google Earth Pro (2021)

## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A cartografia geotécnica é amplamente difundida, com vasta bibliografia. As características multidisciplinares deste campo de atuação resultam na utilização de diferentes terminologias e conceituações por diferentes autores, dificultando a análise da base bibliográfica referente ao escopo do trabalho. A fim de sanar a subjetividade e variação de alguns termos, faz-se o estudo e detalhamento de conceitos importantes para a execução dos modelos estatísticos pretendidos, especificando as concepções adotadas.

### 5.1 MOVIMENTOS DE MASSA E ESCORREGAMENTOS

Segundo FELL et al. (2008), movimentos de massa são quaisquer movimentos que envolvam solos ou rochas através da encosta ou vertente de um morro. Guidicini e Nielbe (1984), definiram movimentos de massa como qualquer tipo de movimento coletivo de materiais rochosos e/ou terrosos, não importando o modo ou o estímulo que culminou no processo.

Dentre os movimentos de massa estão classificados os escorregamentos translacionais rasos, tema central do presente estudo, uma vez que são os movimentos de massa mais recorrentes no Brasil, especialmente na região da Serra do Mar, que abrange uma extensa área do sudeste do país. Escorregamentos são denominados de diversas maneiras, inclusive na linguagem popular, onde são corriqueiramente chamados de deslizamentos ou desbarrancamentos. Na língua inglesa, equivalem ao termo *Landslide* (TOMINAGA, 2007).

Ahrendt (2005) definiu os escorregamentos como um resultado da tensão cisalhante que pode ocorrer em superfícies, abrangendo rochas e solos. A autora também abordou a relação com as superfícies de deslizamento, as quais nem sempre são visíveis ou bem definidas e reiterou que os escorregamentos podem ser progressivos, se dissipando através de pequenas rupturas ou fendas.

Cruden et al. (1994) adotaram o conceito de escorregamento como um movimento de massa terroso, rochoso ou de detritos encosta abaixo. De maneira complementar, a fim de evitar a supracitada subjetividade das terminologias, elaboraram um glossário de termos pertinentes aos movimentos de massa em geral, denominado *Multilingual Landslide Glossary*. O glossário faz uma correlação entre mais de cinquenta termos, adequando-os em seis línguas diferentes.

No Brasil, dentre muitas definições, destaca-se a classificação de Augusto Filho (1992) para movimentos de massa, o qual é uma adaptação do modelo elaborado por Varnes (1978), levando em conta os aspectos característicos das dinâmicas ambientais e geológicas do país. A revisão feita por Augusto Filho (1992) é utilizada pela CEPED/UFSC (2013) na confecção do Atlas brasileiro de desastres naturais e trata de escorregamentos translacionais como processos com poucos planos de deslocamento (externos à superfície), velocidades médias (m/h) a altas (m/s) e com volumes, geometria e materiais variáveis.

## **5.2 FATORES PREDISPOONENTES**

No contexto da redução de riscos ambientais atrelados a escorregamentos, a avaliação e o mapeamento dos fatores condicionantes que podem agir como gatilho para a ocorrência dos mesmos é uma tarefa de grande importância. Uma vez mapeados, estes fatores atuam como parâmetros de entrada para a elaboração dos modelos preditivos e das cartas de suscetibilidade.

Segundo Tominaga (2007), os fatores condicionantes dos movimentos de massa, e conseqüentemente dos escorregamentos, são os elementos do meio físico e biótico os quais contribuem para o desencadeamento de processos que possam resultar em instabilidade das encostas.

Para Ahrendt (2005), alguns destes fatores são inerentes ao solo ou às rochas, majoritariamente devido a sua estrutura ou composição. Outros fatores são, em geral, constantes, como a estabilidade de taludes e, por fim, alguns são amplamente variáveis e imprevisíveis, como a ação da água subsuperficial e superficial. Além disso, a ação antrópica exerce posição de destaque nos fatores condicionantes, alterando atributos e particularidades ambientais e geotécnicas de vertentes.

Para Guidicini e Nielbe (1984), estes fatores são chamados de agentes predisponentes, nomenclatura adotada no presente estudo, e são naturais aos processos geodinâmicos. Varnes (1984) afirma que os agentes causadores de instabilidade em encostas são bem conhecidos, especialmente devido ao alto número de estudos de casos de eventos de instabilidades.

Segundo Azeze (2020), fatores predisponentes se dividem em fatores intrínsecos e externos. Sendo os primeiros relacionados com características físicas e geológicas das

encostas analisadas, como litotipos, existência de falhas e descontinuidades, condições hidrogeológicas, propriedades do solo e características geomorfométricas, como declividade, curvatura e orientação das vertentes. Os fatores externos são definidos como agentes dinâmicos que podem acarretar na ocorrência de escorregamentos através do aumento das forças que atuam na encosta, como chuvas intensas e atividades sísmicas. De modo semelhante, processos desordenados de urbanização também contribuem de maneira significativa para a instabilidade de encostas, gerando cargas adicionais nas vertentes.

Analisando a literatura existente, é possível destacar alguns fatores comumente utilizados como parâmetros de entrada em estudos de suscetibilidade a escorregamentos, independente da influência atribuída a estes e das metodologias utilizadas pelo pesquisador.

Critérios geomorfométricos, geológicos, hidrológicos e antrópicos têm comprovada influência na elaboração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos (YALCIN, 2008). Desta forma, recomenda-se, sempre que possível, a utilização de fatores como declividade, curvatura, geologia, elevação, litologia, pluviosidade, orientação das vertentes, uso e ocupação do solo, distância de ocupações humanas e demais fatores causais.

Por fim, é importante ressaltar que o critério de seleção de dados utilizados na elaboração de modelos preditivos está relacionado com a disponibilidade de informações acerca da região de trabalho, sendo a utilização dos parâmetros de entrada supracitados uma escolha variável, não exigindo a aplicação de todos estes em conjunto e não necessariamente limitando-se aos mesmos.

### **5.3 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS**

Inventários são conjuntos de registros do local, classificação, volume, atividade, data de ocorrência e/ou outras características do escorregamento (FELL, 2008). Sua importância reside na capacidade de apresentar dados de interesse a partir da correlação eventos geodinâmicos passados e futuros, fundamentada no princípio de que áreas com ocorrências de escorregamentos antigos são propensas a hospedá-los novamente.

Escorregamentos antigos podem ser mapeados na forma de vetores, pontos ou polígonos, sendo registrados através da visualização de alterações geomorfológicas nas

encostas, como cicatrizes e zonas de acumulação oriundas do evento. Segundo Ahrendt (2005), os principais mecanismos para o levantamento do inventário de escorregamentos são essencialmente a fotointerpretação, a coleta de dados históricos e a investigação a campo. A abordagem é decidida de acordo com a escala trabalhada, complexidade da área de estudo, experiência do profissional responsável e custos envolvidos.

A qualidade do inventário tem grande influência na credibilidade da carta de suscetibilidade. A confiabilidade e nível de detalhamento podem variar com diversos fatores, como a dificuldade identificação de cicatrizes antigas, que muitas vezes já passaram por processos erosivos e/ou se encontram cobertas por vegetação (OZTURK *et al.*, 2020). Outros fatores podem afetar a acurácia do inventário, como a qualidade da resolução de imagens aéreas e de satélite, o ângulo da incidência solar, presença de nuvens, escala cartográfica, experiência do observador e ferramentas utilizadas (ROSA, 2018; GUZZETTI *et al.*, 2012).

Desta forma, alguns inventários contêm apenas a demarcação das cicatrizes, enquanto outros apenas as zonas de acumulação e/ou depleção. Alguns inventários podem até englobar toda a área afetada pelo escorregamento, sem necessariamente diferenciá-las entre zonas (OZTURK *et al.*, 2020).

Para Guzzetti *et al.* (2012), inventários podem ser elaborados em pequena (<1:200.000), média (entre 1:200.000 e 1:25.000) e larga (>1:25.000) escala, onde destaca-se a utilização da larga-escala em estudos de predição de suscetibilidade. O autor ressalta que os inventários podem ser classificados de acordo com o tipo de mapeamento, como inventários mapeados através de arquivos ou da análise geomorfológica. A primeira modalidade se refere a inventários construídos a partir de dados da literatura e demais fontes similares, enquanto que inventários geomorfológicos são construídos com base em análises visuais de aspectos geomorfológicos da área de estudo, podendo ser feita em ambiente computacional ou em expedições a campo.

De maneira complementar, inventários também podem ser classificados de acordo com seu nível de detalhamento, compreendidos como simples ou complexos, e variação temporal, onde podem ser denominados como históricos, de evento, sazonais e multi-temporais.

Inventários simples apresentam dados genéricos acerca dos escorregamentos, recomendando o aprofundamento em regiões específicas de maior interesse ou propensão a eventos geodinâmicos, enquanto inventários complexos promovem melhor compreensão dos diferentes processos relacionados a uma área susceptível a escorregamentos, subsidiando informações importantes para o planejamento adequado do uso e ocupação da mesma (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).

Acerca da variação temporal, os chamados inventários históricos não levam em consideração a correlação temporal entre cada escorregamento ou apenas apresentam correlações temporais qualitativas como, por exemplo, escorregamentos “muito antigos”, “antigos” ou “novos”. De modo distinto, inventários de evento apresentam escorregamentos ocorridos em decorrência de um evento externo único, como chuvas intensas ou terremotos. Por fim, inventários sazonais apresentam escorregamentos ocorridos durante um espaço definido de tempo, enquanto os multi-sazonais englobam deslizamentos ocorridos ao longo de grandes períodos de tempo, da ordem de décadas, sob influência de diferentes eventos externos (ROSA, 2018).

## 5.4 SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

A área de estudos de movimentos de massa e demais desastres naturais abriga uma variada e extensa gama de terminologias que se complementam ou que detêm significados próximos entre si. As cartas de suscetibilidade são frequentemente associadas e/ou confundidas com cartas de risco, perigo e vulnerabilidade. De fato, há semelhanças entre cada um destes termos, entretanto, tratam-se de terminologias distintas e com empregos específicos. O presente estudo se faz valer das definições elencadas por Bispo (2018), conforme definições apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Definições de perigo, vulnerabilidade, suscetibilidade, risco e área de risco.

<b>Termo</b>	<b>Definição</b>
<b>Perigo</b>	Condição com predisponência para gerar consequências indesejadas. Usualmente está atrelado com a frequência espaço-temporal de ocorrência.
<b>Vulnerabilidade</b>	Nível da possibilidade de um dado elemento, grupo ou comunidade, dado um contexto específico, sofrer danos e impactos negativos decorrentes de um fenômeno ou processo.

<b>Suscetibilidade</b>	Indica a potencialidade de ocorrência de um fenômeno em dada região, manifestando-se em categorias de probabilidade de ocorrência.
<b>Risco</b>	Expressa a relação da suscetibilidade com a quantificação dos impactos sociais e econômicos associados à ocorrência de eventos, levando em consideração a magnitude dos danos. Ainda, o risco tem relação proporcional à vulnerabilidade.
<b>Área de Risco</b>	A área de risco é a área passível de atingimento decorrente da deflagração de eventos e fenômenos que causem impactos negativos. A comunidade que reside na área de risco está sujeita a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais.

Fonte: Adaptado de Bispo (2018).

Uma vez que a suscetibilidade é o foco principal do estudo, lista-se demais conceitos presentes na literatura, de modo a complementar e coincidir com a definição empregada por Bispo (2018).

Segundo Saito (2004), a suscetibilidade a escorregamentos é uma característica inerente ao meio, predizendo sobre sua fragilidade em relação aos processos geodinâmicos. Para Sobreira e Souza (2012), a suscetibilidade é a potencialidade de processos geológicos alterarem as características do meio físico, não importando as consequências destes nas atividades humanas.

Fell *et al.* (2007) definiram a suscetibilidade a escorregamentos como a avaliação quantitativa ou qualitativa da distribuição espacial, volume e classificação dos escorregamentos ocorridos ou que podem vir a ocorrer em uma determinada área.

## **5.5 METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE**

Os métodos de análise de suscetibilidade a escorregamentos vêm evoluindo consideravelmente desde a década de 1970 (REICHENBACH *et al.*, 2018). De lá pra cá, grandes esforços foram direcionados para a compreensão da distribuição espacial e temporal de escorregamentos, bem como seus mecanismos de deflagração (VORPAHL *et al.*, 2012). De maneira geral, pode-se dividir as metodologias de avaliação de suscetibilidade a escorregamentos entre qualitativas e quantitativas, sendo suas ramificações e características tratadas abaixo.



### 5.5.1 METODOLOGIAS QUALITATIVAS

Os primeiros estudos no campo da suscetibilidade foram desenvolvidos com metodologias qualitativas, buscando avaliar a relação entre a distribuição geográfica e os fatores predisponentes dos escorregamentos através da expertise do pesquisador. Técnicas qualitativas são amplamente utilizadas devido ao fato de apresentarem menores custos operacionais. Entretanto, é importante ressaltar que abordagens qualitativas estão sujeitas a subjetividade, uma vez que avaliam a suscetibilidade através de deduções e estimativas que podem ser influenciadas pelo contexto e conjectura do pesquisador (COROMINAS *et al.*, 2014; REICHENBACH *et al.*, 2018; EECKHAUT *et al.*, 2009).

As principais atividades envolvidas nas análises qualitativas de suscetibilidade estão relacionadas ao levantamento dos escorregamentos ocorridos, feito em ambiente computacional ou em inspeções em campo, ambos as maneiras fundamentadas pela identificação visual de cicatrizes oriundas de eventos passados (AZEZE, 2020). A qualidade do inventário e o modo como o mesmo é explorado interfere diretamente nos resultados finais.

É possível notar que diferentes terminologias se aplicam a conceitos semelhantes no ramo da análise qualitativa de suscetibilidade. Deste modo, no presente estudo, a classificação de níveis e ranques entre os fatores condicionantes é classificado como um método heurístico de análise de suscetibilidade, atuando como um subgrupo das metodologias qualitativas.

Brito *et al.* (2014) classificam os modelos heurísticos em análise geomorfológica e combinação de mapas. No primeiro, o nível de suscetibilidade é definido diretamente com base na experiência de um especialista ao comparar cenários de condições semelhantes. No segundo método a expertise do profissional é direcionada à atribuição de pesos às variáveis que atuam como fator condicionante de escorregamentos.

Entre os métodos heurísticos, a combinação de mapas se destaca por permitir que os resultados sejam reproduzidos de maneira semelhante por diferentes pesquisadores, adicionando consistência a metodologia.

As principais análises multicritério a serem aplicadas nos modelos heurísticos são a tabulação cruzada, avaliação baseada em ranques, critérios de pesos, ranque inverso e o processo hierárquico analítico – AHP, de *Analytic Hierarchy Process*. (TEKNOMO,

2006). Abaixo faz-se a descrição detalhada do método AHP, sistema de suporte de decisões utilizado para quantificação da suscetibilidade no presente estudo.

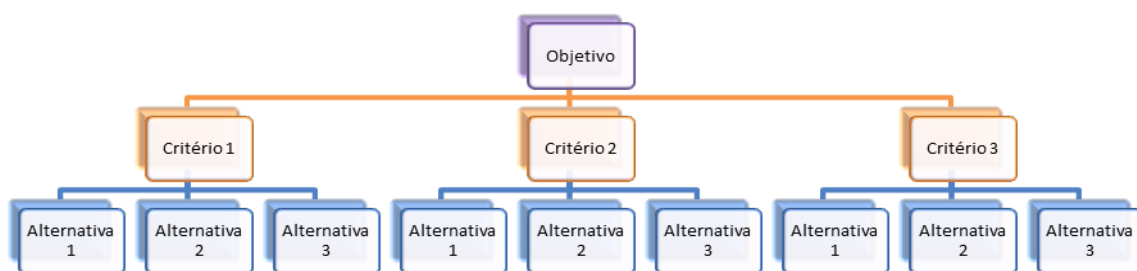
### 5.5.1.1 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSO

O AHP foi proposto pelo professor Thomas Saaty, em 1970. Resumidamente, é um método para obter pesos a partir de comparações de pares de parâmetros (TEKNOMO, 2006).

Segundo Ayala & Frank (2013), dentre as metodologias qualitativas, o método AHP é atualmente um dos mais utilizados na avaliação de suscetibilidade a escorregamentos, tendo como finalidade sanar a subjetividade e as limitações técnicas de gestores e tomadores de decisões ao confrontarem situações onde a seleção de múltiplos critérios está associada a um grupo de alternativas.

A execução do método tem início na seleção de variáveis que compõem o conjunto de parâmetros de entrada para elaboração do modelo, formando a árvore hierárquica conceitual proposta por Saaty (1977), a qual é exposta na Figura 3. No contexto da avaliação de suscetibilidade a escorregamentos, os critérios abordados serão os agentes causais dos escorregamentos, como declividade, litotipos e afins.

**Figura 3:** Modelo de árvore hierárquica multicritério

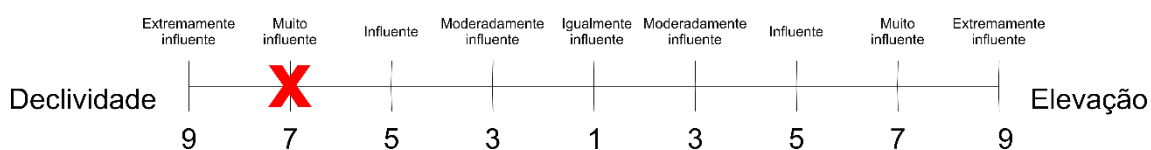


Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Selecionadas as variáveis, estas são comparadas entre si na forma de pares, formando a matriz de comparação par a par, a qual deve ser preenchida com a escala de influência proposta por Saaty (1977), onde, a juízo do pesquisador, valores entre 1/9 e 9 definirão a variação entre cada parâmetro dentro de uma hierarquia de pesos.

A Figura 4 faz menção ao sistema de comparação proposto por Saaty, expondo uma versão adaptada dos estudos de Teknomo (2006) e Brito *et al.* (2016). Na imagem, quanto mais próximo das extremidades, mais influente um parâmetro sobre o outro. Para fins demonstrativos, foi marcado o número 7 da porção esquerda da escala, o que indica que, para o objetivo final (análise de suscetibilidade a escorregamentos) a declividade é muito mais influente que a elevação.

**Figura 4:** Escala de Saaty para comparação de pares.



Fonte: Adaptado de Teknomo (2006).

A matriz de comparação par a par tem sua diagonal principal composta por números 1, independente da ordem da mesma, uma vez que a influência de variáveis idênticas não pode divergir. Ao inserir um valor arbitrário da escala de Saaty em qualquer posição  $aij$  da porção superior da matriz, o mesmo deverá ser espelhado como divisor (sendo 1 o dividendo) na porção superior. Um exemplo conceitual, feito com valores simbólicos, de matriz par a par é exposto na Tabela 2.

**Tabela 2:** Modelo Conceitual de matriz de comparação par a par.

Objetivo	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	...	Fator n
Fator 1	1	3	7	9	...	5
Fator 2	1/3	1	2	3	...	5
Fator 3	1/7	1/2	1	3	...	5
Fator 4	1/9	1/3	1/3	1	...	5
...	...	...	...	...	1	2
Fator n	1/5	1/5	1/5	1/1	1/2	1

Fonte: Elaboração do Autor.

Pequenas variações do modelo de Saaty podem ser conferidas na literatura, especialmente acerca da variação dos valores de influência, conforme visto em Myrondis (2015), Brito *et al.* (2017), Bonini (2020) e Abella & Westen (2008). Para o presente o estudo utilizou-se uma versão direta, aplicando apenas a matriz de comparação entre os fatores predisponentes, e uma multicritério, onde estes fatores foram subdivididos em novas classes de análise.

Após a montagem da matriz e a atribuição da influência de cada parâmetro em relação a seu par, faz-se o cálculo do autovetor da matriz através equação (1), de modo a obter o peso de cada parâmetro de entrada a ser aplicado nas etapas finais da modelagem.

$$Aw = \lambda_{máx} w \quad (1)$$

Na equação, A é a matriz de comparação par a par, w é o vetor de pesos de influência e  $\lambda_{máx}$  o máximo autovalor da matriz A.

A validação dos pesos finais obtidos na matriz é feita através da verificação da razão de consistência – CR, *consistency ratio*, a qual indica a chance de os valores obtidos na matriz de comparação par a par terem sido gerados de maneira aleatória (BELTON, 2002).

A razão de consistência pode ser calculada aplicando-se a divisão do índice de consistência por um índice randômico – RI, *Random Index*, que varia de acordo com a ordem da matriz trabalhada (HUANG *et al.* 2020). A Tabela 3 mostra a variação do índice randômico para matrizes de ordem 1 a 10.

**Tabela 3:** Índices randômicos de consistência.

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1970).

Teknomo (2006) destaca que a razão de consistência deverá ter valores abaixo de 0.10, indicando que o modelo tenha no máximo 10% de inconsistência para ser considerado aceitável. As equações 2 e 3 mostram como obter a taxa de consistência.

$$CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Onde n é a ordem da matriz, CI é o índice de consistência, RI é o índice randômico e CR é a razão de consistência.

Desta forma, cada mapa utilizado para obtenção das variáveis de entrada será multiplicado pelo peso final obtido na matriz, como exposto na equação 4, permitindo a

aplicação da álgebra de mapas para atribuir novos valores a cada pixel da área de estudo, gerando o mapa final de suscetibilidade a escorregamentos.

$$MSE_{AHP} = F1 * w1 + F2 * w2 + \dots + Fn * wn \quad (4)$$

Onde  $MSE_{AHP}$  é o mapa final de suscetibilidade a escorregamentos adquirido através do método AHP,  $F$  os fatores predisponentes adotados e  $w$  seus respectivos pesos calculados.

Para Oliveira *et al.* (2005), a grande vantagem do método AHP reside no fato de que o mesmo atua de maneira compensatória entre os parâmetros utilizados para sua elaboração, uma vez que o desempenho dos critérios e, conseqüentemente, das alternativas utilizadas no modelo está diretamente relacionado com a disponibilidade de uma base de dados adequada e completa da área de estudo, o que nem sempre é uma realidade no panorama nacional, especialmente em pequenos municípios e distritos.

### 5.5.2 METODOLOGIAS QUANTITATIVAS

A partir da década de 1980, métodos quantitativos passaram a ser desenvolvidos, definindo a suscetibilidade a escorregamentos a partir de estimativas probabilísticas. Para Corominas *et al.* (2014) e Fell *et al.* (2007), a utilização de abordagens quantitativas se difere das qualitativas em termos dados de entrada, procedimentos utilizados e resultados obtidos. Enquanto a avaliação qualitativa exprime resultados descritivos, como classificações do tipo “baixo, médio e alto” e índices numéricos, enquanto estudos quantitativos quantificam e exprimem em termos de probabilidade a ocorrência de escorregamentos em uma dada zona suscetível.

Contudo, não é possível implicar que uma abordagem é superior a outra. Metodologias quantitativas, por exemplo, geralmente necessitam de modelos digitais de elevação – MDEs de alta qualidade e de uma extensa e precisa base de dados que irá subsidiar o cálculo dos possíveis cenários de deflagração de escorregamentos. A limitação ao acesso destes dados implica no possível aumento do desvio padrão das análises, tornando-as inválidas ou tendenciosas (COROMINAS *et al.*, 2014).

Barella e Sobreira (2015) ressaltam que as diferentes abordagens existentes não podem ser igualmente aplicadas e que a escolha de uma delas deve considerar a escala trabalhada, a área cartografada, a qualidade da base de dados e os custos envolvidos.

Em geral, métodos quantitativos podem ser categorizados em bivariados e multivariados, sendo que nos anos recentes a modelagem com base na mineração de dados tem apresentado destaque significativo (KAVZOGLU, 2014).

### **5.5.2.1 ESTATÍSTICA BIVARIADA**

Dentre as metodologias quantitativas, destaca-se a empregabilidade da estatística bivariada, método objetivo e direto que permite diferenciar a influência de cada subclasse na ocorrência dos escorregamentos. Neste método, a presença de escorregamentos em uma dada região é considerada uma variável dependente, enquanto os fatores predisponentes são considerados variáveis independentes (SHAHABI *et al.*, 2012).

Um aspecto primordial dos métodos estatísticos bivariados é a classificação da densidade de escorregamentos em cada subclasse dos mapas paramétricos de entrada. A partir desse cálculo é possível afirmar o grau de suscetibilidade associado a cada categoria dos grupos principais (HODASOVÁ, 2020).

Uma vez que cada parâmetro de entrada foi ponderado e associado com seu respectivo peso, geram-se os mapas finais que irão subsidiar a aplicação da álgebra de mapas, onde, no ambiente GIS, faz-se o somatório dos mesmos. O resultado desta equação será o mapa de suscetibilidade a escorregamentos. Diversos métodos de reclassificação podem ser aplicados para a delimitação das 5 classes comumente utilizadas, variando entre “muito baixa” e “muito alta” suscetibilidade.

As principais vantagens dos métodos bivariados estão na sua fácil aplicação e no fato de que vários mapas paramétricos podem ser combinados e avaliados simultaneamente. Em contrapartida, faz-se menção a incapacidade do método em prever variações temporais e correlacionais as classes entre si, além de subjetividade existente na escolha dos parâmetros de entrada, uma vez que, tal qual nos métodos qualitativos, essa escolha pode ser influenciada pela expertise do condutor do estudo (YALCIN, 2008).

Dentre as principais abordagens estatísticas bivariadas destacam-se os métodos da taxa de frequência, também conhecida como *likelihood ratio*, valor informativo e pesos de evidência. Sendo o método da Taxa de Frequência aplicado neste estudo, sua concepção é detalhada abaixo.

### 5.5.2.2 TAXA DE FREQUÊNCIA

O método da taxa de frequência é a razão entre a ocorrência e não ocorrência de um elemento ou evento em um pixel de uma dada classe de um universo definido de variáveis (HODASOVÁ, 2020). No contexto do estudo, pode-se dizer que a taxa de frequência será dada, por exemplo, pela razão ocorrência de escorregamentos em um pixel de uma das subclasses (ex. faixa de declividade entre 0 e 7,2°) e a área da classe (ex. declividade) em relação a área total de estudo.

O resultado final pode ser trabalhado de diferentes maneiras e com diferentes unidades de medida, como pixel ou área, uma vez que o valor final será dado pela proporção entre a porcentagem de ocorrência de escorregamentos e a porcentagem da área da classe avaliada em relação à área total de estudo, sendo um valor adimensional.

O método da taxa de frequência tem como vantagem a implementação simples e a fácil compreensão de seus resultados. Além disso, permite a análise de um grande volume de dados com considerável agilidade (METEN *et al.*, 2015).

Em outras palavras, a construção do modelo se dá através da classificação de diversas subclasses que irão compor os parâmetros de entrada, daí em diante é feita a aplicação da taxa de frequência para calcular os efeitos das subclasses em relação à ocorrência de escorregamentos (HUANG *et al.*, 2020). A equação 5 mostra como é feito o cálculo da taxa de frequência.

$$\text{Taxa de Frequência} = \frac{\frac{N(\text{esc},i)}{N(a,i)}}{\frac{N(\text{esc},a)}{N(a)}} \quad (5)$$

Onde,  $N(\text{esc},i)$  é a área com ocorrência de escorregamentos na subclasse  $i$ ;  $N(a,i)$  é a área da subclasse  $i$ ;  $N(\text{esc},a)$  é a área total de escorregamentos na classe em questão e  $N(a)$  é a área total da região estudada.

### 5.5.2.3 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Diferentemente da estatística bivariada, onde determina-se uma variável dependente para se correlacionar com as variáveis independentes, a estatística multivariada leva em consideração a relação mútua entre cada fator causal aplicado na modelagem de suscetibilidade. O peso destes fatores indica a contribuição relativa de cada um deles na ocorrência de escorregamentos em uma dada região (AZEZE, 2020).

Segundo Kavzoglu (2014), nos métodos multivariados todas as variáveis independentes são enfatizadas e tratadas juntas, possibilitando a referida análise da contribuição relativa de cada uma destas para a ocorrência de escorregamentos. Para o autor, modelos estatísticos multivariados são mais eficazes que os bivariados, promovendo resultados mais reais e precisos. No entanto, requerem maior esforço computacional de processamento, são altamente dependentes da qualidade dos dados de entrada e podem estar associados a elevados custos.

Os principais métodos estatísticos multivariados usados na análise de suscetibilidade a escorregamentos são a análise discriminante, regressão logística e análise de cluster.

#### **5.5.2.4 MINERAÇÃO DE DADOS**

Nos últimos anos, as técnicas de análise de suscetibilidade com base na mineração de dados se mostram cada vez mais populares em diversas áreas da engenharia. Essa propagação é resultante da capacidade destes métodos em lidar com grandes volumes de dados. Shahabi *et al.* (2020) enfatizam que essas metodologias tem evidenciado um bom desempenho na geração de diversos modelos de suscetibilidade, como de enchentes, incêndios, escorregamentos, entre outros.

Algoritmos de aprendizado de máquina são exemplos de técnicas de mineração de dados que podem ser desenvolvidas no contexto de escorregamentos de massa. Estas abordagens envolvem diferentes conceitos estatísticos, os quais têm variadas terminologias, aplicações e esforços computacionais. No entanto, são fundamentadas pelas mesmas suposições que regem as metodologias estatísticas bivariadas e multivariadas (CHANG *et al.*, 2019).

Os principais métodos baseados em mineração de dados incluem o *Random Forest*, *Naive Bayes*, Máquina de Suporte de Vetores, logística regressa de Kernel e Redes Artificiais Neurais. Todos estes modelos exprimem resultados precisos e confiáveis, superando a capacidade preditiva dos modelos estatísticos convencionais. Todavia, modelos baseados em mineração de dados e aprendizado de máquinas requerem grande esforço computacional. Além disso, estão sujeitos à tendência dos dados de entrada e são incapazes de compreender e lidar com *outliers* dentro das classes definidas (AZEZE, 2020).



## 5.6 MAPAS DE SUSCETIBILIDADE

Mapas ou cartas de suscetibilidade são os produtos finais obtidos através da aplicação das diferentes metodologias citadas na revisão bibliográfica. Diferentes do inventário de escorregamentos, estas cartas dividem a região de estudo em áreas de maior e menor predisposição a escorregamentos (ROSA, 2018).

Highland & bobrowsky (2008) também destacam que os mapas de suscetibilidade a escorregamentos vão além dos inventários, discretizando áreas que têm potencial de sofrer escorregamentos através correlação dos fatores que influenciaram sua ocorrência e a distribuição passada dos mesmos. Os autores destacam que estes mapas apontam apenas a estabilidade relativa das encostas, não fazendo previsões absolutas.

Em outros termos, mapas de suscetibilidade são caracterizados por intervalos de valores que definem diferentes graus de vulnerabilidade para uma dada região. Estes intervalos são comumente divididos em três ou cinco classes qualitativas de potencial, como “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”. O principal método utilizado nessa divisão é o método de *natural breaks* de classificação de intervalos. (HODASOVÁ, 2020; BEDNARIK at al., 2010).

## 5.7 VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SUSCETIBILIDADE

A validação de modelos preditivos de suscetibilidade pode ser feita através de diferentes técnicas de validação. Segundo Azeze (2020), métodos como *predictive rate curve* e *success rate curve*, densidade de escorregamentos, índice relativo de densidade de escorregamentos, erro relativo e *receiver operating characteristics* (ROC) – Curva ROC são comumente aplicados na tarefa de validação de modelos.

### 5.7.1 SUCCESS/PREDICTIVE RATE CURVES

As técnicas de *success/predictive rate curve* são executadas de maneira semelhante, apesar de expressarem resultados distintos. A *success rate curve* pode ser obtida empregando a porcentagem cumulativa dos escorregamentos do grupo treino contra a porcentagem cumulativa da área suscetível a escorregamentos obtida no mapa final, enquanto a *predictive rate curve* pode ser calculada através do uso da porcentagem cumulativa dos escorregamentos do grupo teste contra a área do mapa (METEN *et al.*, 2020).

A *success rate curve* explica o quão bem e como os resultados de suscetibilidade a escorregamentos são classificados na área de estudo através dos dados de treino, ao passo que a *predictive rate curve* explica a capacidade preditiva para um fator predisponente específico utilizado no modelo (AZEZE, 2020).

Segundo Barella *et al.* (2019), as *rate curves* são amplamente utilizadas para validação de modelos estatísticos de suscetibilidade a escorregamentos e, por exprimirem representações gráficas, podem ser avaliadas através do cálculo da área abaixo das mesmas. Para os autores, quanto mais íngreme a curva gerada, melhor é a habilidade do modelo em descrever a distribuição dos escorregamentos.

### 5.7.2 DENSIDADE DE ESCORREGAMENTOS

A densidade de escorregamentos (DE) é feita através da divisão da porcentagem dos escorregamentos observados pela porcentagem dos escorregamentos previstos no modelo, conforme a equação 6. Quanto maior a densidade de escorregamentos nas classes definidas de “alta” e “muito alta” suscetibilidade, maior a precisão e confiabilidade do modelo (FAYEZ *et al.*, 2018).

$$DE = \frac{\% EO}{\% EP} \quad (6)$$

Onde DE é a densidade de escorregamentos, % EO é a porcentagem de escorregamentos observados e % EP é a porcentagem de escorregamentos previstos no modelo final.

### 5.7.3 ÍNDICE RELATIVO DE DENSIDADE

Segundo Azeze (2020), o índice relativo de densidade de escorregamentos, denominado *R-Index*, pode validar o modelo de suscetibilidade a escorregamentos através da aplicação da equação 7.

$$R - index = \frac{\frac{ni}{Ni}}{\sum \left( \frac{ni}{Ni} \right) * 100} \quad (7)$$

Onde ni é o número de escorregamentos em uma dada classe e Ni é o número de pixels dos escorregamentos dentro dessa classe. Deste modo, a equação traz a comparação entre o mapa de suscetibilidade e o inventário de escorregamentos.

Se os valores do índice relativo aumentarem das classes mais baixas para as classes mais altas de suscetibilidade, o modelo é considerado preciso e confiável (SHAHABI *et al.*, 2012).

#### 5.7.4 ERRO RELATIVO

A técnica do erro relativo permite avaliar a acurácia e precisão do modelo de suscetibilidade de maneira simples. Para tal, faz-se uso da equação 8, exposta abaixo.

$$Erro\ Relativo = \sum NET - \frac{\sum NEZA}{\sum NET} \quad (8)$$

Onde NET é o número de escorregamentos totais e NEZA é o número de escorregamentos ocorridos nas classes de “alta” e “muito alta” suscetibilidade definidas no mapa final. Segundo Fressaard *et al.* (2014), se o resultado do cálculo do erro relativo for menor ou igual a 0,5 e mais da metade dos escorregamentos mapeados estiverem localizados em classes de “alta” e “muito alta” suscetibilidade, o modelo é considerado preciso e confiável.

#### 5.7.5 CURVA ROC

A avaliação da performance de modelos de suscetibilidade através da curva ROC, *Receiver Operating Characteristics*, se dá a partir da representação gráfica gerada pelo modelo, onde o eixo y é composto pela taxa de positivos verdadeiros e o eixo x é dado pela taxa de falsos positivos (BRITO, 2014).

Para AZEZE (2020), a área abaixo da curva – AAC, varia entre 0.5 e 1, sendo a principal característica para o diagnóstico positivo ou negativo do modelo de predição, como exposto na Tabela 4.

**Tabela 4:** Faixas de performance para a Curva ROC.

Faixa AUC	Performance do modelo
Entre 0,9 e 1	Excelente
Entre 0,8 e 0,9	Muito bom
Entre 0,7 e 0,8	bom
Entre 0,6 e 0,7	médio
Abaixo de 0,6	Ruim

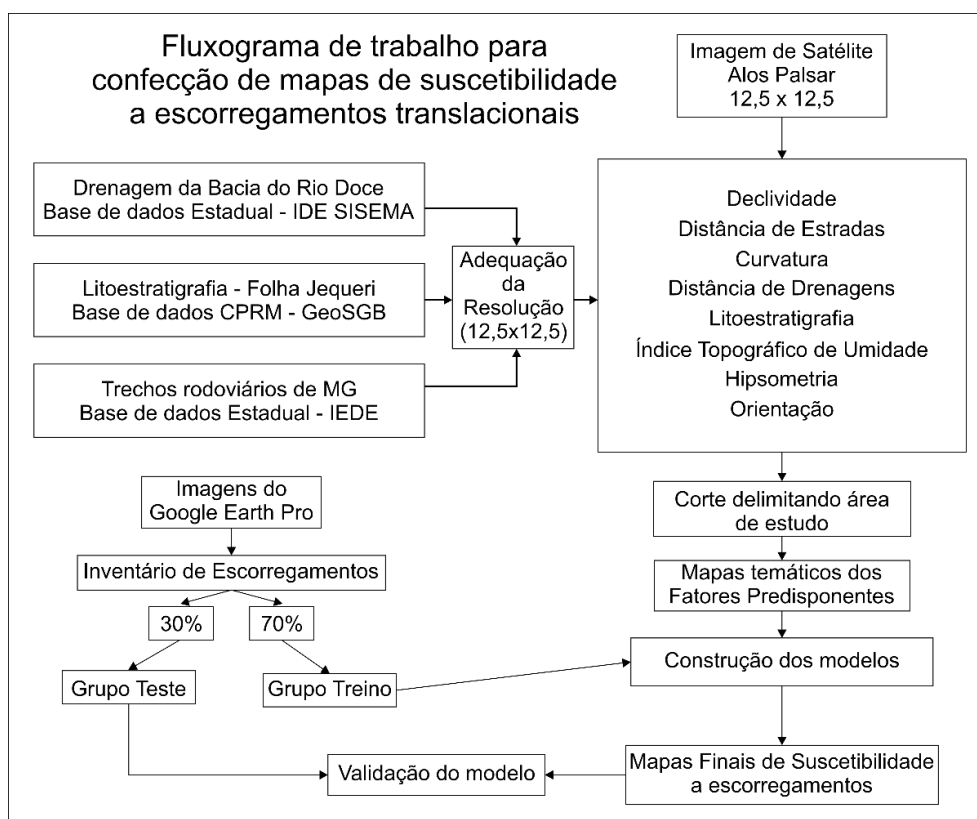
Fonte: Adaptado de Azeze (2020).

## 6. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para a elaboração dos modelos de suscetibilidade seguiu fluxo de trabalho semelhante para os dois métodos selecionados, sendo eles: Taxa de Frequência e AHP.

Os mapas paramétricos empregados na modelagem foram os mesmos, tal como o inventário de escorregamentos e a divisão de grupos de treino e teste que fundamentaram o estudo. A Figura 5 mostra o planejamento adotado para sua confecção.

**Figura 5:** Fluxograma de trabalho aplicado na elaboração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos.



Fonte: Elaboração do Autor.

### 6.1 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO

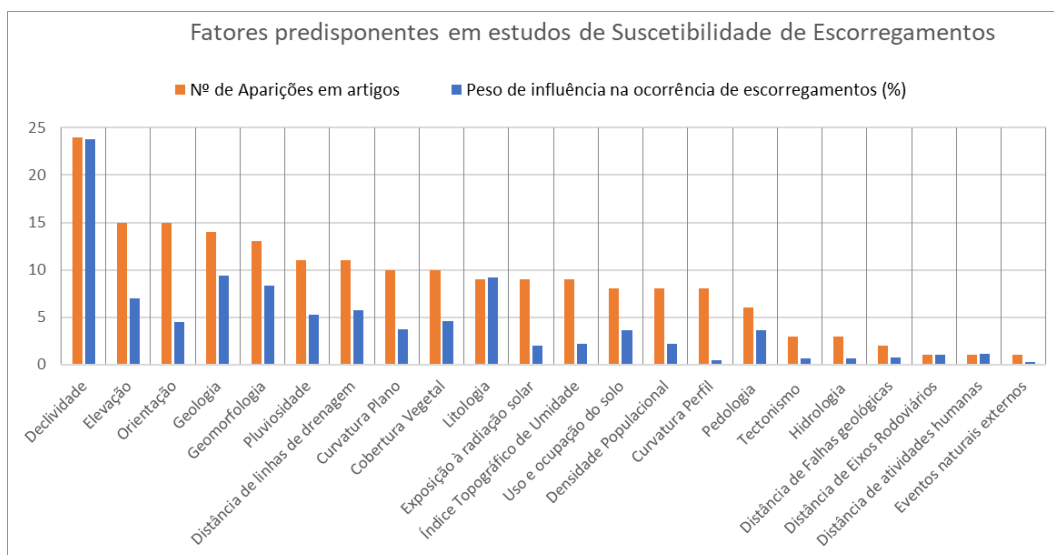
A definição dos fatores de predisposição levou em consideração a análise de trabalhos pretéritos. Ao todo foram avaliados 15 estudos elaborados entre 2008 e 2021, em 11 países diferentes, abordando 25 metodologias, sendo 12 métodos qualitativos e 13 quantitativos (Abella & Westen, 2008; Bednarik *et al.*, 2020; Bijukchhen, 2012; Bispo, 2018; Brito *et al.*, 2017; Gabeliini, 2017; Hodasová, 2020; Huang *et al.*, 2020; Jorge,

2012; Junqueira *et al.*, 2019; Kavzoglu, 2014; Keb *et al.*, 2021; Nguyen & Liu, 2019; Rocha, 2021; Ruff, 2008).

Vinte (20) fatores causais foram abordados nestes artigos, sendo elencados os pesos da influência de cada um destes na ocorrência de escorregamentos. Esta listagem permitiu analisar o número de vezes que cada fator predisponente foi empregado na avaliação de suscetibilidade a escorregamentos. Desta forma, após normalizar os valores apresentados nos estudos, foi possível estimar a porcentagem de influência de cada fator dentro do universo dos 20 fatores selecionados.

O gráfico da Figura 6 mostra a relação supracitada e traz informações importantes sobre o perfil dos estudos de análise da suscetibilidade a escorregamentos. Muito pode-se inferir a partir deste levantamento, mas destaca-se a ampla empregabilidade da declividade em relação aos demais fatores, sendo o indicador mais importante nos estudos dessa temática. Outro ponto importante reside na elevada variação entre o número de aparições e o grau de influência de alguns fatores, como a elevação e a orientação das vertentes. É possível inferir que estes parâmetros são comumente aplicados devido a sua facilidade de obtenção, mas que sua quantificação em termos de influência não tem amplo destaque.

**Figura 6:** Panorama dos fatores predisponentes de escorregamentos em estudos de suscetibilidade.



Fonte: Elaboração do Autor.

Dos fatores predisponentes listados, oito foram selecionados para elaboração dos modelos de suscetibilidade a escorregamentos, sendo estes: i) Elevação; ii) Declividade;

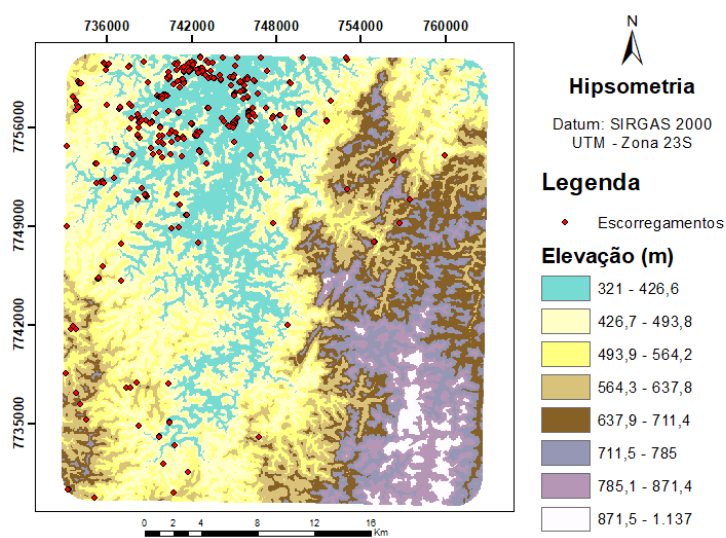
iii) Litotipos; iv) Distância das linhas de Drenagem; v) Orientação das vertentes; vi) Curvatura plana; vii) Índice Topográfico de umidade e; viii) Distância de eixos rodoviários.

A escolha destes fatores foi selecionada com base na análise do levantamento bibliográfico e na disponibilidade de bases de dados que permitam o manejo descomplicado das informações, favorecendo o uso de bases de ampla acessibilidade e fomentadas por órgãos governamentais, de modo a reafirmar o compromisso do estudo com a adequação de municípios com poucos recursos à Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012.

A modelagem dos parâmetros geomorfométricos foi feita a partir do Modelo Digital de Elevação do satélite ALOS, *Advanced Land Observing Satellite*, sensor PALSAR, *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*, por gerar imagens com pixel de 12,5m de resolução e por ser obtido de maneira gratuita no site *asf.alaska.edu*.

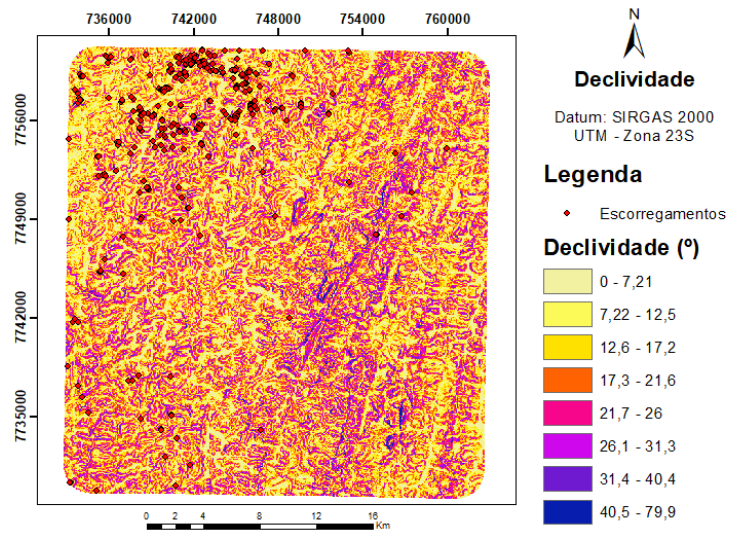
Através do conjunto de ferramentas de análise de superfície do software ArcGis, da *Environmental Systems Research Institute* – ESRI, foram elaborados os mapas de hipsometria, declividade, curvatura plana e orientação das vertentes. A Figura 7 mostra o mapa de hipsometria, a Figura 8 o de declividade, a Figura 9 o de curvatura e a Figura 10 o de orientação das vertentes.

**Figura 7:** Mapa de parâmetro de entrada – Hipsometria.



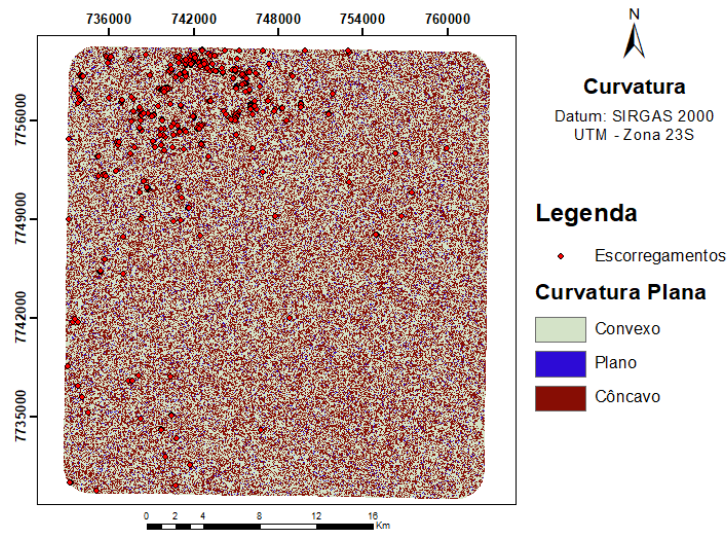
Fonte: Elaboração do Autor

**Figura 8:** Mapa de parâmetro de entrada – Declividade.



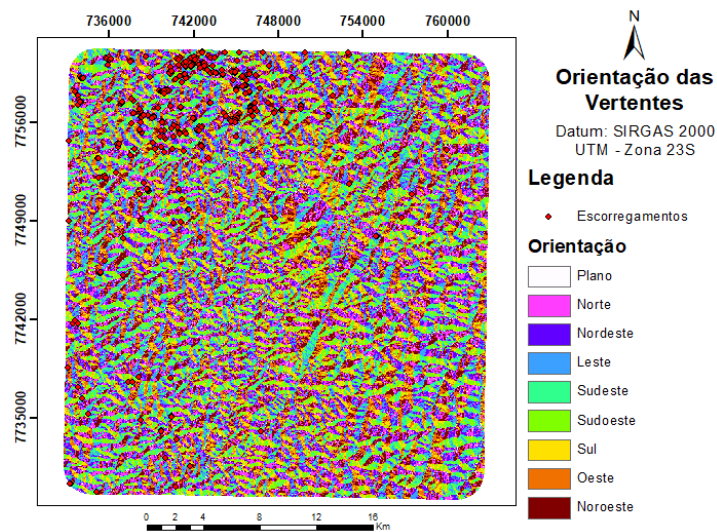
Fonte: Elaboração do Autor.

**Figura 9:** Mapa de parâmetro de entrada – Curvatura.



Fonte: Elaboração do Autor.

**Figura 10:** Mapa de parâmetro de entrada – Orientação.



Fonte: Elaboração do Autor.

Também foi obtido por meio do modelo digital de elevação o índice topográfico de umidade, fator que possibilita a análise espacial da distribuição hidrológica de áreas possivelmente saturadas por meio da correlação entre a declividade e a área de contribuição da microbacia onde se encontra a área de estudo (NAVES & ALMDEIDA, 2021).

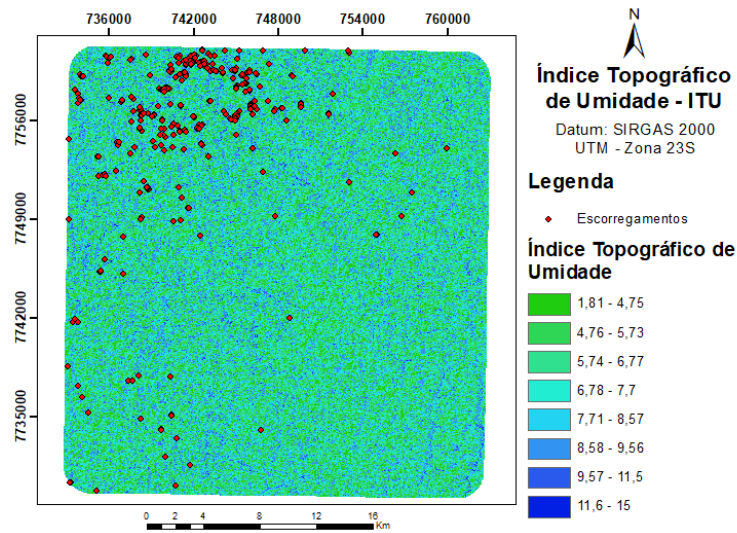


Os valores da área de contribuição são obtidos pela extração do acúmulo e da direção do fluxo de água da área de estudo, levantamento feito em ambiente computacional. A partir disso, realiza-se o cálculo sugerido por Naves & Almeida (2021), conforme a equação 9. A Figura 11 mostra o mapa do índice topográfico de umidade.

$$ITU = \ln \frac{AC}{\tan \beta} \quad (9)$$

Onde ITU é o índice topográfico de umidade, AC é a área de contribuição e  $\beta$  é a declividade.

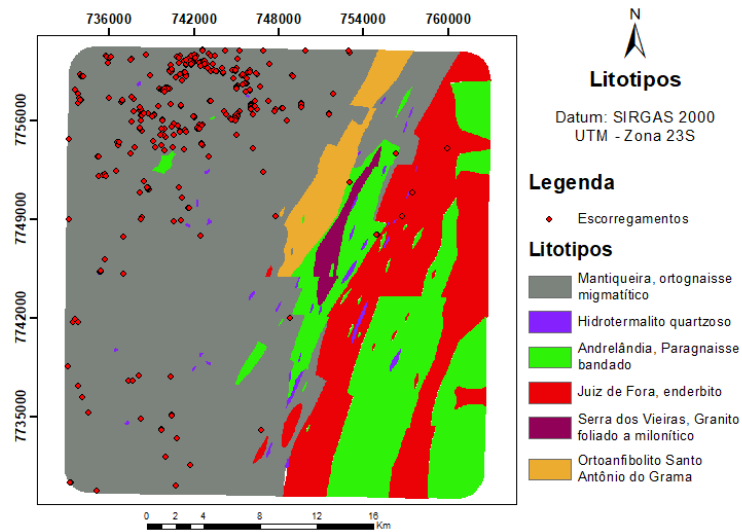
**Figura 11:** Mapa de parâmetro de entrada – Índice Topográfico de Umidade.



Fonte: Elaboração do Autor.

O mapa dos litotipos foi obtido através do estudo da geologia e recursos minerais da Folha Jequeri SF.23-X-B-II, elaborado na escala 1:50.000 por Queiroga *et al.* (2014). A Figura 12 mostra a adequação do mapa à região de estudo.

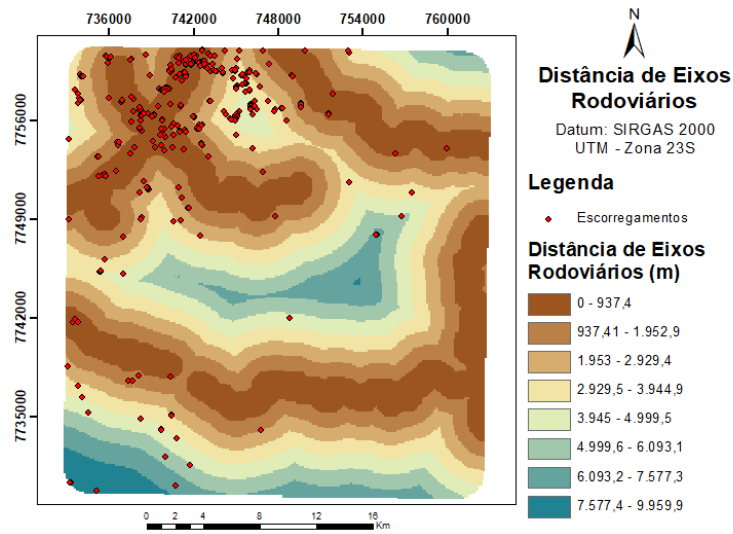
**Figura 12:** Mapa de parâmetro de entrada – Litotipos



Fonte: Adaptado de Queiroga *et al.* (2014).

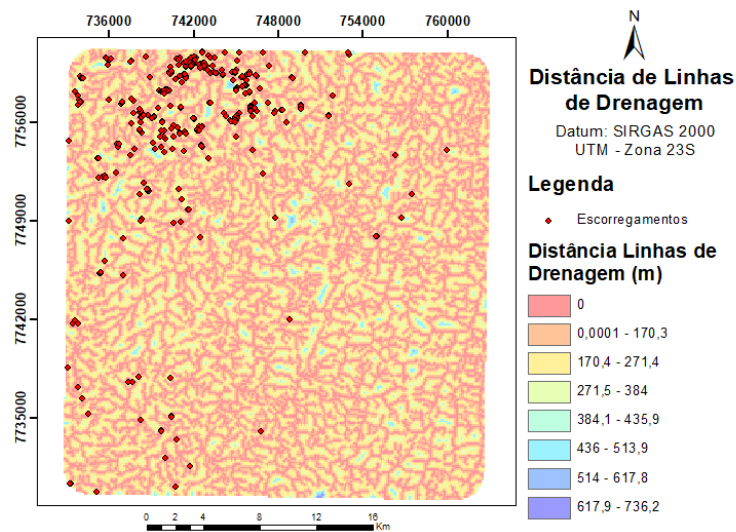
Por último, foram gerados os mapas de distância das linhas de drenagem e de eixos rodoviários. Os trechos rodoviários foram obtidos através do catálogo de sistemas de transportes disponível na Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais – IEDE/MG, enquanto a drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Doce foi obtida a partir da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IDE/SISEMA. Em posse destes dados, fez-se o cálculo da distância euclidiana destes atributos. As Figuras 13 e 14 exibem os mapas de distância de eixos rodoviários e de linhas de drenagem.

**Figura 13:** Mapa de parâmetro de entrada – Distância de eixos Rodoviários.



Fonte: Elaboração do Autor.

**Figura 14:** Mapa de parâmetro de entrada – Distância de Linhas de Drenagem.



Fonte: Elaboração do Autor.

Todos os parâmetros mencionados foram classificados pelo método de quebras naturais.

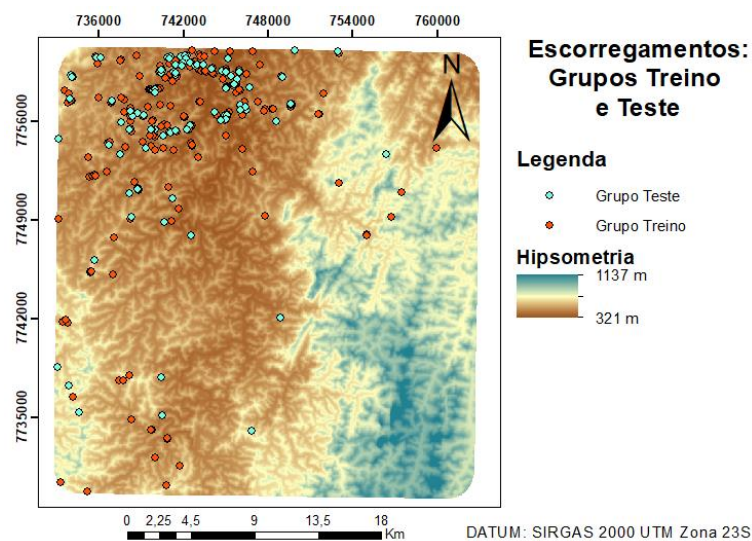
## 6.2 DIVISÃO DO INVENTÁRIO

O inventário de cicatrizes elaborado por Carvalho (2021) foi disponibilizado no formato *shapefile*, se tratando de um inventário de evento. Ao todo, 324 escorregamentos

foram mapeados na forma de polígonos, sendo a maioria destes escorregamentos translacionais rasos.

Dividiu-se o mesmo em dois grupos denominados treino e teste, com 70 e 30% dos escorregamentos, respectivamente. Essa divisão possibilita que o grupo treino seja utilizado para a elaboração do modelo de suscetibilidade e, simultaneamente, para avaliação de sua acurácia, ao passo que o grupo teste é utilizado para aferição da capacidade de predição do modelo (BARELLA *et al.*, 2019). Desta maneira, evita-se que o modelo gerado seja aplicado sem o conhecimento de sua real capacidade de prever a ocorrência de novos escorregamentos e, adicionalmente, reduz-se as chances da ocorrência de sobreajuste, situação onde o modelo se adapta muito bem ao conjunto de dados de entrada, mas se torna amplamente tendencioso, perdendo a capacidade de prever acerca de novos eventos. A Figura 15 mostra os dois grupos na zona de estudo.

**Figura 15:** Grupos de escorregamentos mapeados e divididos em grupos de treino e teste.



Fonte: Elaboração do Autor.

### 6.3 MODELAGEM COM TAXA DE FREQUÊNCIA

O desenvolvimento dos cálculos de taxa de frequência foi elaborado no software Microsoft Excel, enquanto a obtenção dos dados de entrada do modelo ocorreu por meio de ferramentas do software ArcGis.

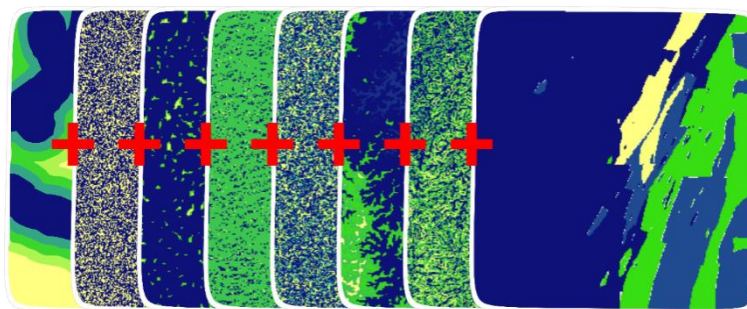
No primeiro passo da modelagem, obteve-se o número de pixels existentes em cada subclasse de todos os parâmetros de entrada do modelo.

Calculado o número de pixels em cada subclasse dos mapas paramétricos, prosseguiu-se para o cálculo do número de pixels de escorregamentos existentes nestas subclasses. Estes dados foram adquiridos por intermédio da tabulação cruzada entre o grupo treino e cada mapa paramétrico elaborado no estudo, de modo a interceder as áreas em comuns entre os dois conjuntos de dados.

Adiante, aplicou-se a equação 5 com finalidade de obter a taxa de frequência de cada subclasse. Estas taxas foram inseridas nas tabelas de atributos dos mapas paramétricos de entrada, gerando uma nova imagem restrita ao novo intervalo de valores. Em seguida, fez-se a aplicação da álgebra de mapas, cujo resultado é o mapa de suscetibilidade a escorregamentos feito com base no método da taxa de frequência. A Figura 16 exemplifica a soma algébrica aplicada.

Por fim, executou-se a reclassificação do mapa de suscetibilidade através de quebras naturais, método que verifica pontos de quebra baseado na semelhança de valores e na melhor distribuição de categorias (PIRES, 2010). No modelo em questão, estas categorias foram denominadas “muito baixa”, “baixa”, “moderada”, “alta” e “muito alta”.

**Figura 16:** Combinação conceitual de mapas paramétricos.



Fonte: Elaboração do Autor.

Os resultados obtidos para os cálculos da taxa de frequência são dispostos na Tabela 5, onde PPC são os pixels por classe, PDE são os pixels de escorregamento e TF é a taxa de frequência.

**Tabela 5:** Valores de Taxa de Frequência obtidos para cada subclasse.

Classe	Subclasses	PPC	PPC(%)	PDE	PDE(%)	TF
Elevação (m)	321 - 426,6	864455	14,34	36406,25	26,87	1,87
	426,6 - 493,8	1365678	22,65	64062,5	47,29	2,09
	493,8 - 564,2	1046235	17,35	23750	17,53	1,01

	564,2 - 637,8	766018	12,71	7187,5	5,31	0,42
	637,8 - 711,4	729383	12,10	2968,75	2,19	0,18
	711,4 - 785,0	615107	10,20	1093,75	0,81	0,08
	785,0 - 871,4	468655	7,77	0	0,00	0,00
	871,4 - 1137	173589	2,88	0	0,00	0,00
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>
	0 - 7,2	827688	13,73	2031,25	1,50	0,11
	7,2 - 12,5	1173422	19,46	9843,75	7,27	0,37
	12,5 - 17,2	1236651	20,51	17500	12,92	0,63
	17,2 - 21,6	1169612	19,40	24687,5	18,22	0,94
<b>Declividade(°)</b>	21,6 - 26,0	872012	14,46	35625	26,30	1,82
	26,0 - 31,3	518476	8,60	31718,75	23,41	2,72
	31,3 - 40,4	197218	3,27	14062,5	10,38	3,17
	40,4 - 79,9	24563	0,41	0	0,00	0,00
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>
	0 - 937,4	1284740	21,31	59218,75	43,97	2,06
	937,4 - 1952,9	1210109	20,07	30625	22,74	1,13
	1952,9 - 2929,4	1045192	17,34	13437,5	9,98	0,58
<b>Distância de Eixos Rodoviários (m)</b>	2929,4 - 3944,9	893372	14,82	23125	17,17	1,16
	3944,9 - 4999,5	681776	11,31	6562,5	4,87	0,43
	4999,5 - 6093,1	543878	9,02	781,25	0,58	0,06
	6093,1 - 7577,3	290613	4,82	781,25	0,58	0,12
	7577,3 - 9959,9	85283	1,41	156,25	0,12	0,08
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>
	0	1551959	25,72	18906,25	13,77	0,54
	0,1 - 170,3	2993097	49,60	67343,75	49,03	0,99
	170,3 - 271,4	1122557	18,60	32187,5	23,44	1,26
<b>Distância de Linhas de Drenagem (m)</b>	271,4 - 383,9	312039	5,17	15156,25	11,04	2,13
	383,9 - 435,9	33632	0,56	3750	2,73	4,90
	435,9 - 513,8	16942	0,28	0	0,00	0,00
	513,9 - 617,8	2504	0,04	0	0,00	0,00
	617,8 - 736,2	1482	0,02	0	0,00	0,00
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>
	01,80 - 04,70	781302	12,95	24687,5	18,24	1,41
	04,75 - 05,73	1162378	19,27	31250	23,09	1,20
	05,73 - 06,77	1176830	19,51	29062,5	21,48	1,10
<b>Índice Topográfico de Umidade</b>	06,77 - 07,70	990489	16,42	22500	16,63	1,01
	07,70 - 08,57	914382	15,16	14062,5	10,39	0,69
	08,57 - 09,55	809201	13,41	13281,25	9,82	0,73
	09,55 - 11,52	183577	3,04	468,75	0,35	0,11
	11,52 - 14,98	14806	0,25	0	0,00	0,00
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>
	Convexo	3358809	55,71	74843,75	55,25	0,99
<b>Curvatura</b>	Plano	240342	3,99	4843,75	3,58	0,90
	Côncavo	2429969	40,30	55781,25	41,18	1,02
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>

<b>Orientação</b>	Plano	96701	1,61	1406,25	1,04	0,65
	Norte	756587	12,57	22031,25	16,26	1,29
	Nordeste	729024	12,11	21406,25	15,80	1,30
	Leste	725919	12,06	15156,25	11,19	0,93
	Sul	776310	12,90	20937,5	15,46	1,20
	Sudeste	735650	12,22	17500	12,92	1,06
	Sudoeste	677587	11,26	9531,25	7,04	0,63
	Oeste	689036	11,45	11718,75	8,65	0,76
	Noroeste	832828	13,84	15781,25	11,65	0,84
<b>Classe</b>	<b>Subclasses</b>	<b>PPC</b>	<b>PPC(%)</b>	<b>PDE</b>	<b>PDE(%)</b>	<b>TF</b>
<b>Litotipos</b>	Mantiqueira, ortognaisse migmatítico	3643782	60,75	131718,75	97,58	1,60
	Hidrotermalito quartzoso	30942	0,52	2187,5	1,15	3,13
	Andrelândia, Paragnaisses bandados	1043126	17,39	781,25	0,81	0,03
	Juiz de Fora, enderbito	1001728	16,70	625	0,46	0,03
	Serra dos Vieiras, Granito foliado a milonítico	63200	1,05	0	0,00	0,00
	Ortoanfibolito Santo Antônio do Grama	215280	3,59	0	0,00	0,00

Fonte: Elaboração do Autor.

## 6.4 MODELAGEM COM AHP

Uma vez que o AHP é um método heurístico de análise de suscetibilidade, onde a atribuições de pesos para cada fator causal é feita com base na expertise de um profissional e, portanto, está sujeita a subjetividade e experiência do mesmo, foi feito um levantamento, a partir de consulta bibliográfica, sobre o grau de importância dos parâmetros utilizados na construção do modelo de suscetibilidade.

Deste modo, a análise de artigos e teses relacionados com o mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos serviu como alternativa técnica para a qualificação dos parâmetros de entrada e auxiliou a elaboração do estudo na forma de valores de referência.

Foram elaboradas matrizes de comparação par a par para cada parâmetro de entrada, de modo a verificar o nível de influência de cada subclasse dos fatores condicionantes.

As matrizes de comparação e as taxas de consistência do método foram obtidas pela calculadora analítica de processos hierárquicos disponível no site

<https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc1.php>. A ferramenta possibilitou a comparação por pares de maneira ágil e intuitiva, gerando automaticamente o autovalor e autovetor da matriz, tal como os pesos finais para cada nível analisado. A validação dos valores obtidos foi feita por intermédio da calculadora AHP online disponível em <http://www.isc.senshu-u.ac.jp/~thc0456/EAHP/AHPweb.html>, onde foram obtidos valores semelhantes em todas as análises.

Os pesos finais das subclasses foram inseridos na tabela de atributos dos mapas paramétricos com o mesmo método da taxa de frequência. Após isso, executou-se a soma dos mesmos, resultando no mapa de suscetibilidade final.

Tal como na aplicação do método da taxa de frequência, em ambos os métodos AHP, fez-se a reclassificação do mapa de suscetibilidade através de quebras naturais, gerando as categorias “muito baixa”, “baixa”, “moderada”, “alta” e “muito alta”. As quebras naturais foram utilizadas nos dois mapas devido ao fato do estudo ser comparativo, uma vez que sua aplicação mantém a constância na divisão das categorias.

As matrizes elaboradas, os coeficientes CI, RI e CR, e os pesos finais associados às subclasses são dispostos nas Tabelas 6 a 13.

**Tabela 6:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da declividade.

Declividade (°)	0 - 7,2	7,2 - 12,5	12,5 - 17,2	17,2 - 21,6	21,6 - 26,0	26,0 - 31,3	31,3 - 40,4	40,4 - 79,9	PF
0 - 7,2	1,00	2,00	2,00	2,00	4,00	5,00	6,00	7,00	0,28
7,2 - 12,5	0,50	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	6,00	6,00	0,25
12,5 - 17,2	0,50	0,33	1,00	2,00	2,00	4,00	4,00	5,00	0,15
17,2 - 21,6	0,50	0,33	0,50	1,00	3,00	3,00	3,00	4,00	0,12
21,6 - 26,0	0,25	0,33	0,50	0,33	1,00	3,00	3,00	3,00	0,08
26,0 - 31,3	0,20	0,20	0,25	0,33	0,33	1,00	3,00	3,00	0,05
31,3 - 40,4	0,17	0,17	0,25	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00	0,04
40,4 - 79,9	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,33	0,50	1,00	0,03

Ordem da matriz: 8; CI = 0,0672; RI = 1,41; CR = 0,047 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaboração do Autor.

**Tabela 7:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Hipsometria.

Hipsometria (m)	321 - 426,6	426,6 - 493,8	493,8 - 564,2	564,2 - 637,8	637,8 - 711,4	711,4 - 785,0	785,0 - 871,4	871,4 - 1137	PF
321 - 426,6	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	0,17
426,6 - 493,8	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	0,27



<b>493,8 - 564,2</b>	1,00	0,33	1,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	0,18
<b>564,2 - 637,8</b>	0,50	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	4,00	0,11
<b>637,8 - 711,4</b>	0,50	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	4,00	4,00	0,12
<b>711,4 - 785,0</b>	0,50	0,25	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00	4,00	0,07
<b>785,0 - 871,4</b>	0,33	0,25	0,33	0,33	0,25	0,50	1,00	1,00	0,04
<b>871,4 - 1137</b>	0,33	0,25	0,33	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	0,04

Ordem da matriz: 8; CI = 0,087; RI = 1,41; CR = 0,061 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaboração do Autor.

**Tabela 8:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Distância das Linhas de Drenagem.

<b>Distância Linhas de Drenagem (m)</b>	<b>0</b>	<b>0,1 - 170,3</b>	<b>170,3 - 271,4</b>	<b>271,4 - 383,9</b>	<b>383,9 - 435,9</b>	<b>435,9 - 513,8</b>	<b>513,9 - 617,8</b>	<b>617,8 - 736,2</b>	<b>PF</b>
<b>0</b>	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	6,00	7,00	8,00	0,23
<b>0,1 - 170,3</b>	1,00	1,00	1,00	2,00	4,00	5,00	5,00	6,00	0,23
<b>170,3 - 271,4</b>	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	4,00	6,00	7,00	0,20
<b>271,4 - 383,9</b>	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	7,00	0,13
<b>383,9 - 435,9</b>	0,33	0,25	0,50	0,50	1,00	2,00	5,00	7,00	0,10
<b>435,9 - 513,8</b>	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	3,00	5,00	0,06
<b>513,9 - 617,8</b>	0,14	0,20	0,17	0,25	0,20	0,33	1,00	3,00	0,03
<b>617,8 - 736,2</b>	0,13	0,17	0,14	0,14	0,14	0,20	0,33	1,00	0,02

Ordem da matriz: 8; CI = 0,0665; RI = 1,41; CR = 0,047 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaboração do Autor.

**Tabela 9:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Distância de Eixos Rodoviários.

<b>Distância Eixos Rodoviários (m)</b>	<b>0 - 937,4</b>	<b>937,4 - 1952,9</b>	<b>1952,9 - 2929,4</b>	<b>2929,4 - 3944,9</b>	<b>3944,9 - 4999,5</b>	<b>4999,5 - 6093,1</b>	<b>6093,1 - 7577,3</b>	<b>7577,3 - 9959,9</b>	<b>PF</b>
<b>0 - 937,4</b>	1,00	2,00	5,00	4,00	7,00	7,00	8,00	9,00	0,36
<b>937,4 - 1952,9</b>	0,50	1,00	3,00	4,00	5,00	6,00	6,00	7,00	0,24
<b>1952,9 - 2929,4</b>	0,20	0,33	1,00	3,00	4,00	5,00	5,00	6,00	0,15
<b>2929,4 - 3944,9</b>	0,25	0,25	0,33	1,00	4,00	5,00	5,00	6,00	0,11
<b>3944,9 - 4999,5</b>	0,14	0,20	0,25	0,25	1,00	2,00	4,00	5,00	0,06
<b>4999,5 - 6093,1</b>	0,14	0,17	0,20	0,20	0,50	1,00	1,00	2,00	0,03
<b>6093,1 - 7577,3</b>	0,13	0,17	0,20	0,20	0,25	1,00	1,00	2,00	0,03

<b>7577,3 - 9959,9</b>	0,11	0,14	0,17	0,17	0,20	0,50	0,50	1,00	0,02
------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Ordem da matriz: 8; CI = 0,1003; RI = 1,41; CR = 0,0711 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaboração do Autor.

**Tabela 10:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise do Índice Topográfico de Umidade.

<b>Índice Topográfico de Umidade</b>	<b>01,80 - 04,70</b>	<b>04,75 - 05,73</b>	<b>05,73 - 06,77</b>	<b>06,77 - 07,70</b>	<b>07,70 - 08,57</b>	<b>08,57 - 09,55</b>	<b>09,55 - 11,52</b>	<b>11,52 - 14,98</b>	<b>PF</b>
<b>01,80 - 04,70</b>	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	4,00	6,00	7,00	0,20
<b>04,75 - 05,73</b>	1,00	1,00	2,00	2,00	4,00	6,00	7,00	7,00	0,26
<b>05,73 - 06,77</b>	1,00	0,50	1,00	2,00	4,00	5,00	6,00	1,00	0,18
<b>06,77 - 07,70</b>	0,50	0,50	0,50	1,00	3,00	4,00	5,00	5,00	0,15
<b>07,70 - 08,57</b>	0,50	0,25	0,25	0,33	1,00	2,00	3,00	4,00	0,08
<b>08,57 - 09,55</b>	0,25	0,17	0,20	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	0,05
<b>09,55 - 11,52</b>	0,17	0,14	0,17	0,20	0,33	0,50	1,00	2,00	0,03
<b>11,52 - 14,98</b>	0,14	0,14	1,00	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,04

Ordem da matriz: 8; CI = 0,1253; RI = 1,41; CR = 0,088 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaboração do Autor

**Tabela 11:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Curvatura

<b>Curvatura Plana</b>	<b>Convexo</b>	<b>Concavo</b>	<b>Plano</b>	<b>PF</b>
<b>Convexo</b>	1,00	1,00	6,00	0,48
<b>Concavo</b>	1,00	1,00	4,00	0,42
<b>Plano</b>	0,17	0,25	1,00	0,09

Ordem da matriz: 3; CI = 0,0110; RI = 0,58; CR = 0,0191 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

**Tabela 12:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise da Orientação.

<b>Orientação</b>	<b>Flat</b>	<b>N</b>	<b>NE</b>	<b>E</b>	<b>SE</b>	<b>SE</b>	<b>SW</b>	<b>W</b>	<b>NW</b>	<b>PF</b>
<b>Flat</b>	1,00	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,09
<b>N</b>	9,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,18
<b>NE</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10
<b>E</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10
<b>SE</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10
<b>SE</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10
<b>SW</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10
<b>W</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10
<b>NW</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10

Ordem da matriz: 9; CI = 0,0702; RI = 1,49; CR = 0,047 – Modelo Aceitável.

Fonte: Elaboração do Autor.

**Tabela 13:** Matriz de comparação par a par para o método AHP. Análise dos litotipos.

<b>Litotipos</b>	<b>MOM</b>	<b>HQO</b>	<b>GPA</b>	<b>JEF</b>	<b>SDV</b>	<b>OSG</b>	<b>PF</b>
<b>MOM</b>	1,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	0,62
<b>HQO</b>	0,11	1,00	1,00	1,00	3,00	5,00	0,11
<b>GPA</b>	0,11	1,00	1,00	1,00	3,00	4,00	0,10
<b>JEF</b>	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,07
<b>SDV</b>	0,11	0,33	0,33	1,00	1,00	2,00	0,05
<b>OSG</b>	0,11	0,20	0,25	1,00	0,50	1,00	0,04

Ordem da matriz: 6; CI = 0,8483; RI = 1,24; CR = 0,0681 – Modelo Aceitável.

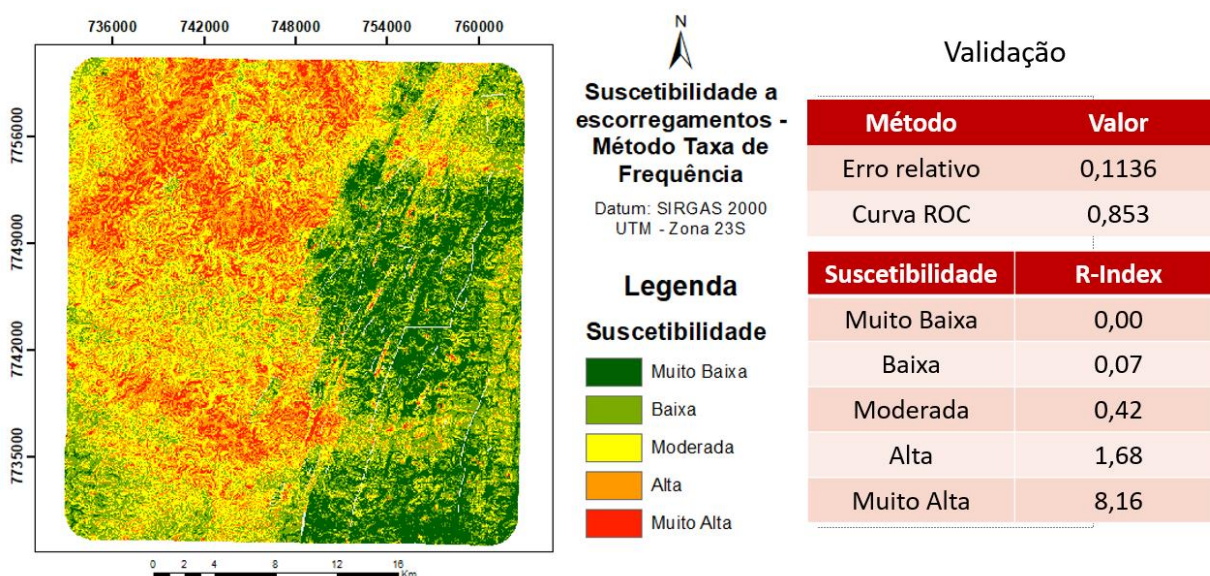
Fonte: Elaboração do Autor.

Para a Tabela 13, informa-se: Mantiqueira, ortognaisse migmatítico – MOM; Hidrotermalito quartzoso – HQO; Andrelândia, Paragnaises bandados – GPA; Juiz de Fora, enderbito – JFE; Serra dos Vieiras, Granito foliado a milonítico– SDV; Ortoanfibilito Santo Antônio do Grama – OSG; Pesos Finais – Pf.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

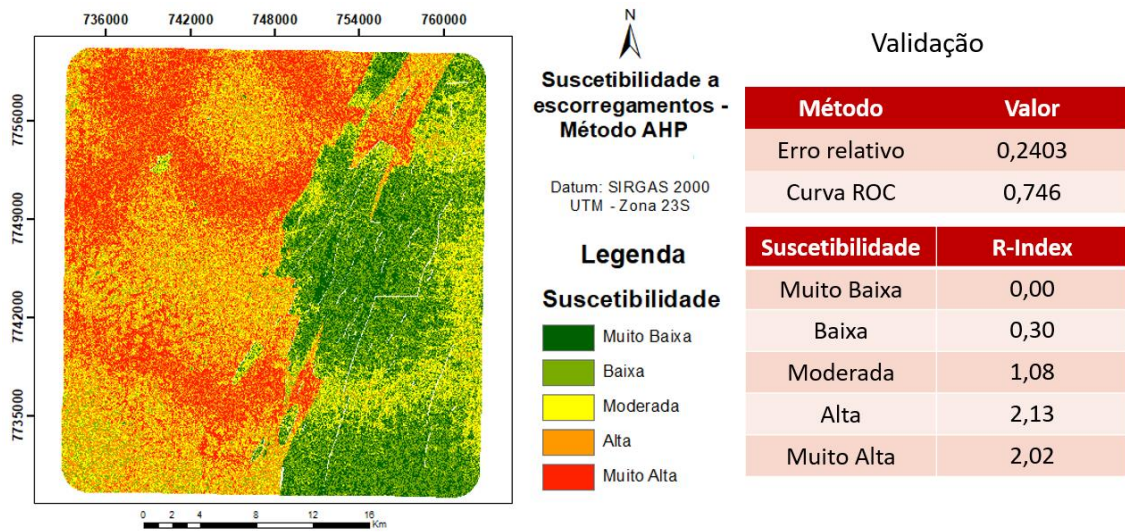
Os modelos obtidos apresentaram características visuais distintas em diversos aspectos, todavia, nota-se que os dois resultados concentram zonas de maior propensão a escorregamentos na porção oeste do mapa, região marcada pelo domínio do complexo Mantiqueira. Também cabe destaque a influência visual da distância dos eixos rodoviários nas zonas de alta suscetibilidade. A principal variação entre os dois métodos reside na maneira como as categorias alta e muito alta se dissipam ao longo da porção oeste da região de estudo. Os mapas finais e um resumo dos resultados das validações são dispostos nas Figuras 17 e 18, sendo o modo como foram obtidos e a discussão acerca destes valores abordados adiante.

**Figura 17:** Modelo de suscetibilidade a escorregamentos e resultados das validações – Taxa de frequência.



Fonte: Elaboração do Autor.

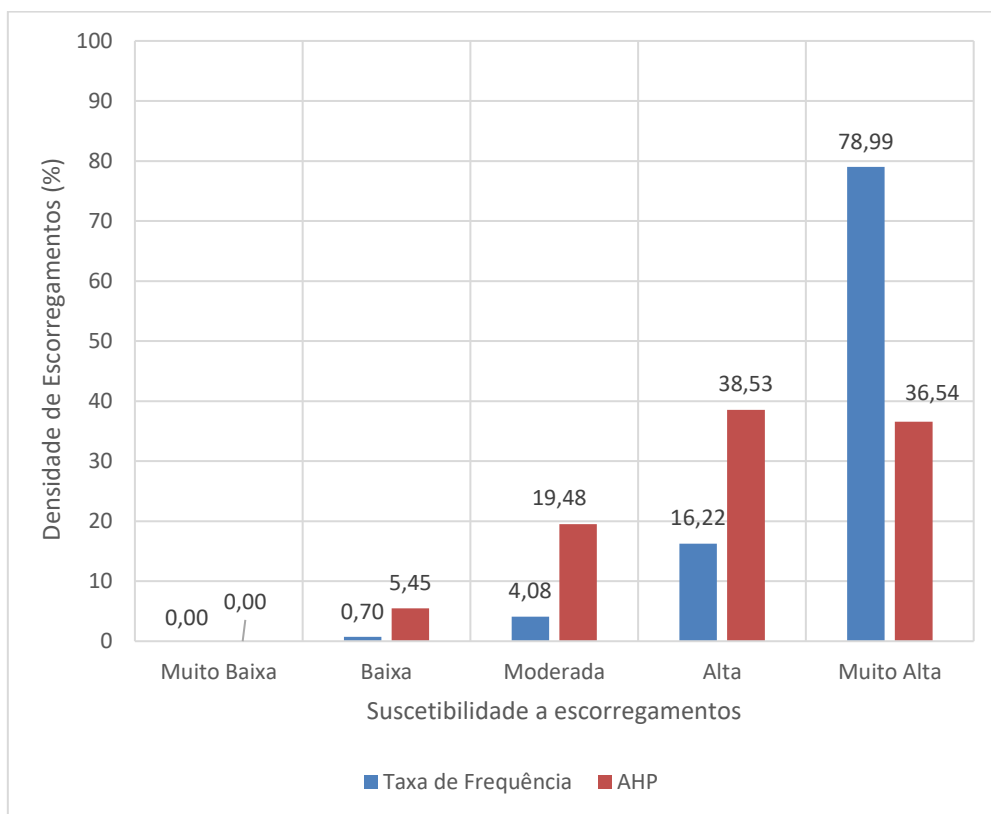
**Figura 18:** Modelo de suscetibilidade a escorregamentos e resultados das validações – AHP.



Fonte: Elaboração do Autor.

Gerados os modelos finais de suscetibilidade a escorregamentos, fez-se uma análise do panorama de distribuição da densidade de escorregamentos em cada categoria definida, de modo a auxiliar na visualização e compreensão dos dados e fomentar a análise comparativa entre cada modelo. Esta análise é feita por meio da razão de pixels de escorregamentos da categoria pelo número total de pixels totais da mesma categoria e é exposta na Figura 19.

**Figura 19:** Porcentagem da densidade de escorregamentos por metodologia e categoria empregada.



Fonte: Elaboração do Autor.

Analisando o gráfico é possível inferir que o método AHP tem maior densidade de escorregamentos na categoria “alta” do que na “muito alta”. Essa condição, apesar de inesperada, não invalida o modelo e pode ser atribuída à diferença considerável de extensão territorial, cerca de 25 km<sup>2</sup>, entre ambas as categorias.

Neste contexto, a comparação do desempenho de cada método foi feita com base nos valores obtidos nos testes de validação aplicados, os quais expressam de maneira quantitativa a capacidade preditiva dos métodos. Para tal, foram empregados os métodos R-Index, erro relativo e curva ROC. As Tabelas 14 e 15 mostram os resultados do R-Index e do erro relativo para as duas metodologias.

**Tabela 14:** Validação R-Index e Erro Relativo – Método FR

Classe	Pixels por Classe	Pixels por Classe (%)	Pixels Escorregados	Pixels Escorregados (%)	R-Index	Erro Relativo
<b>Muito baixa</b>	1007161	16,86	0,00	0,00	0,00	0,1136
<b>Baixa</b>	1328022	22,23	625,00	1,30	0,07	

<b>Moderada</b>	1770981	29,64	4843,75	10,06	0,42
<b>Alta</b>	1336829	22,38	14531,25	30,19	1,68
<b>Muito Alta</b>	531445	8,90	28125,00	58,44	8,16

Fonte: Elaboração do Autor.

**Tabela 15:** Validação R-Index e Erro Relativo – Método AHP.

<b>Classe</b>	<b>Pixels por Classe</b>	<b>Pixels por Classe (%)</b>	<b>Pixels Escorregados</b>	<b>Pixels Escorregados (%)</b>	<b>R-Index</b>	<b>Erro Relativo</b>
<b>Muito baixa</b>	752071	12,59	0,00	0,00	0,00	
<b>Baixa</b>	1197517	20,04	2343,75	4,87	0,30	
<b>Moderada</b>	1317422	22,05	9218,75	19,16	1,08	0,2403
<b>Alta</b>	1433773	24,00	19843,75	41,23	2,13	
<b>Muito Alta</b>	1273655	21,32	16718,75	34,74	2,02	

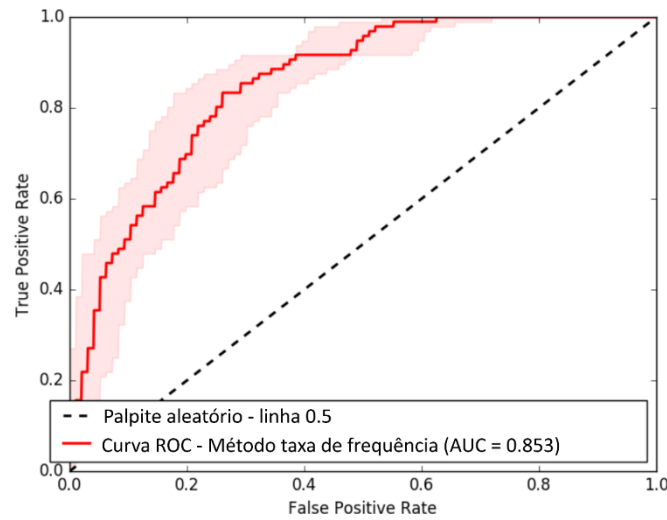
Fonte: Elaboração do Autor.

Em ambos os modelos os valores obtidos por intermédio do R-Index aumentam das classes “muito baixa” e “baixa” para as classes “alta” e “muito alta”, indicando que são considerados precisos e confiáveis.

Os resultados do erro relativo complementam os resultados obtidos no R-Index, uma vez que se obteve valores inferiores a 0,5. Adicionalmente, nota-se que mais da metade dos escorregamentos mapeados encontram-se localizados em classes de “alta” e “muito alta” suscetibilidade, fato condizente com o arcabouço teórico acerca da metodologia de validação. Desta forma, os dois modelos foram considerados precisos e confiáveis.

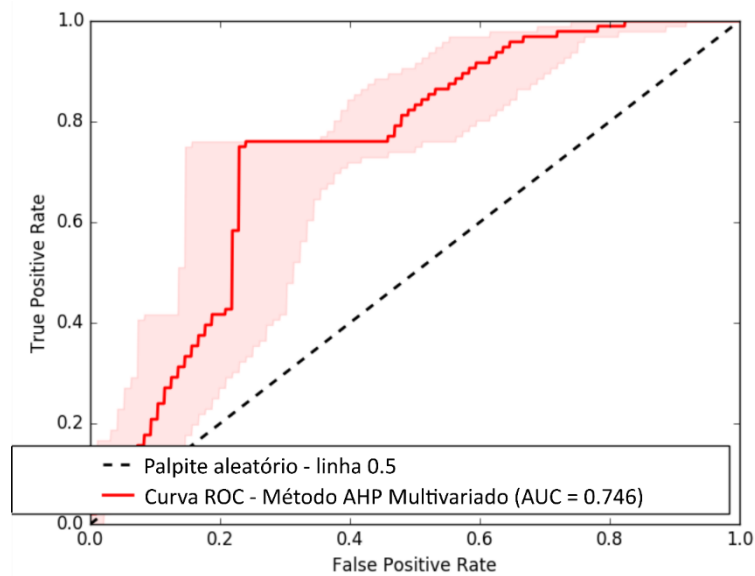
Por fim, fez-se a validação final por meio da aplicação da curva ROC utilizando o *plug-in* ArcSDM, desenvolvido pelo Professor Carlos R. de Souza Filho da Universidade de Campinas - UNICAMP. Sua reprodução foi feita por meio do cruzamento dos escorregamentos do grupo teste com os mapas categóricos de suscetibilidade. Neste cenário, o grupo teste de cicatrizes agiu como conjunto de dados verdadeiros-positivos, referenciando-os como o eixo da sensibilidade. Os valores de área abaixo da curva adquiridos foram de 0,853 para o método taxa de frequência e 0,746 para o AHP como mostram as Figuras 20, 21.

**Figura 20:** Curva ROC e AAC para o método taxa de frequência.



Fonte: Elaboração do Autor

**Figura 21:** Curva ROC e AAC para o método AHP.



Fonte: Elaboração do Autor.

Conforme a classificação de Azeze (2020), estes resultados indicam que o método da taxa de frequência tem desempenho muito bom e que o AHP tem desempenho bom.

Os valores de AAC encontrados para a carta confeccionada com a metodologia da taxa de frequência (0,853) são semelhantes aos encontrados nos trabalhos de Hodasová (2020), Meten *et al* (2015), Mohammady (2012) e Park *et al.* (2012) os quais obtiveram valores de AAC iguais a 0,884, 0,877, 0,801 e 0,794, respectivamente.



Acerca do AHP, resultados similares são vistos nos estudos propostos por Huang *et al.* (2020), Hodasová (2020), Kab *et al.* (2021) e Park *et al.* (2012), onde foram obtidos valores de AAC iguais a 0,773, 0,798 e 0,782 e 0,789, respectivamente.

Visualmente, nota-se a grande influência dos litotipos no contraste das zonas de “alta” e “muito alta” com as zonas de “baixa” e “muito baixa” suscetibilidade. Pode-se atribuir à existência deste contraste o fato de que 97,58% das cicatrizes de escorregamentos estão localizadas na porção oeste do mapa, região sob domínio do litotipo complexo Mantiqueira, relacionado com a ocorrência de ortognaisses migmatíticos e gnaisses enderbíticos.

Outro fator de destaque na análise visual dos modelos é a distância de eixos rodoviários, fator pouco utilizado em estudos dessa temática, conforme verificado no levantamento bibliográfico. Apesar do reduzido número de aparições do fator nos modelos de suscetibilidade a escorregamentos, a distância dos eixos rodoviários se mostrou um fator antropogênico de grande influência na ocorrência de escorregamentos.

Estradas construídas em vertentes podem alterar negativamente o equilíbrio das cargas no talude, contribuindo com a propensão do meio à escorregamentos (YALCIN, 2008). Para Juliev *et al.* (2018), a distância dos eixos rodoviários tem grande relação com a ocorrência de escorregamentos.

Deste modo, é possível afirmar que o parâmetro pode sim ter grande impacto na geração das cartas finais de suscetibilidade. Contudo, cabe ressaltar que a distância entre cada subclasse da distância dos eixos rodoviários pode ter influenciado de maneira tendenciosa no nível de influência do parâmetro, uma vez que as quebras naturais, empregadas por conta da natureza comparativa do estudo, definiram grandes distâncias para cada subclasse. Neste contexto, levando em conta a referida finalidade do estudo, é cabível questionar acerca da influência da redução destas distâncias em estudos apropriados, fato anotado no presente trabalho como recomendação futura.

O baixo destaque visual dos demais fatores predisponentes utilizados como dados de entrada na modelagem podem estar atrelados à concentração das cicatrizes de escorregamentos na porção Noroeste da área de estudo. Por se tratar de um inventário de cicatrizes de evento, baseado na ocorrência específica de uma chuva torrencial de grandes proporções ocorrida no ano 2017, a distribuição das cicatrizes pode não condizer com

condições usuais de propensão a escorregamentos no contexto das características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas da região, sendo fruto da concentração pluviométrica excessiva em determinada porção da área de estudo.

## 8. CONCLUSÃO

O aumento da ocorrência de desastres naturais e os prejuízos inerentes, especialmente os escorregamentos translacionais rasos, alertam sobre a necessidade de melhorar o planejamento de expansão territorial urbana no cenário municipal mineiro, sendo as cartas de suscetibilidade um recurso relevante na mitigação destes impactos.

Neste estudo foram elaboradas cartas de suscetibilidade a escorregamentos para uma área de aproximadamente 900km<sup>2</sup>, englobando por completo o município de Santo Antônio do Gramma-MG e parcialmente as cidades circunvizinhas. Para tal, foram empregadas duas metodologias distintas, denominadas taxa de frequência e AHP. De modo geral, os resultados alcançados foram satisfatórios e permitiram concluir acerca de diversos aspectos contextuais da cartografia geotécnica.

Em relação aos fatores predisponentes utilizados, destaca-se a influência da declividade, litotipos e distância de eixos rodoviários, com notório grau de impacto nas modelagens. Neste sentido, se faz necessário citar a possível influência das fortes chuvas ocorridas em dezembro de 2017, evento que fundamentou o levantamento das cicatrizes que compuseram o inventário utilizado na elaboração do estudo. Acredita-se que este seja o fator de maior influência na concentração dos escorregamentos na porção noroeste da região de estudo, fato que teve destaque na geração dos pesos de influência finais de cada parâmetro utilizado no estudo.

A respeito do desempenho dos métodos, destaca-se que ambos mostraram acurácia convincente, fácil reprodutibilidade e boa capacidade de predição. Contudo, destaca-se o desempenho notadamente superior da taxa de frequência, superando a metodologia AHP em todos os testes de validação.

Reitera-se sobre a facilidade de reprodução dos resultados obtidos no estudo, fator de significativa importância no contexto da gestão pública voltada a prevenção de escorregamentos. Ambos os métodos podem ser executados de maneira ágil e gratuita, sendo o emprego do modelo estatístico bivariado mais vantajoso que AHP por não depender da expertise do técnico em questão.

Esse contexto reafirma o cumprimento do principal objetivo do estudo: a confirmação da possibilidade de elaborar cartas de suscetibilidade a escorregamentos

através de bancos de dados acessíveis ao poder público, contribuindo com a adequação dos municípios à lei nº 12.608/2012.

## **9. RECOMENDAÇÕES**

Recomenda-se para estudos futuros o levantamento e aplicação de dados pluviométricos, também disponíveis gratuitamente nos órgãos governamentais competentes. Acredita-se que residem nestes dados as respostas para questionamentos cruciais na elaboração do presente estudo, especialmente no que tange à concentração das cicatrizes do inventário.

Ademais, aconselha-se o levantamento da variação temporal de ocorrência dos escorregamentos mapeados. Tais dados podem ampliar significativamente o número de informações conclusivas acerca da carta de suscetibilidade.

Recomenda-se a redução do intervalo dos valores das subclasses do parâmetro distância de eixos rodoviários, aplicando condições mais condizentes com a real influência destes em vertentes e encostas.

Por fim, recomenda-se a aplicação de um número maior de fatores predisponentes, desde que esses sejam condicionalmente independentes, com ênfase em agentes antrópicos e geológicos, como uso e ocupação do solo, cobertura vegetal, litologia e geomorfologia, elementos que, se trabalhados em escalas apropriadas, podem adicionar robustez considerável nos modelos de suscetibilidade.

## **10.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABELLA, Enrique A. Castellanos; VAN WESTEN, Cees J. **Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba.** *Geomorphology*, v. 94, n. 3-4, p. 453-466, 2008.

AHRENDT, Adriana. **Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP.** 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

AUGUSTO FILHO, O. **Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle. Apostila do curso de geologia de engenharia aplicada a problemas ambientais.** São Paulo: IPT. 1992.

AYALA, Néstor Fabián; FRANK, Alejandro Germán. **Métodos de análise multicriterial: uma revisão das forças e fraquezas. Semana de Engenharia de Produção Sul Americana** (13.: 2013 jun. 9-11: Gramado, RS). Anais. Porto Alegre: FEEng. 2013.

AZEZE, Azemeraw Wubalem. **Assessments of Geotechnical Condition of Landslide Sites and Slope Stability Analysis Using Limit Equilibrium Method around Gundwin Town Area, Northwestern Ethiopia.** 2020.

BARELLA, C.F.; SOBREIRA, F. G.; ZÊZERE, J.L. **A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil.** *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, n. 5, p. 3205-3221, 2019.

BELTON, Valerie; STEWART, Theodor. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach.** Springer Science & Business Media, 2002.

BIJUKCHHEN, Subeg Man; KAYASTHA, Prabin; DHITAL, Megh Raj. **A comparative evaluation of heuristic and bivariate statistical modelling for landslide susceptibility mappings in Ghurmi–Dhad Khola, east Nepal.** *Arabian Journal of Geosciences*, v. 6, n. 8, p. 2727-2743, 2013.

BISPO, C. O. **Suscetibilidade natural e induzida à ocorrência de escorregamentos no litoral norte de Maceió, Alagoas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2018.

BITAR, Omar Yazbek; FREITAS, Carlos Geraldo Luz de; MACEDO, Eduardo Soares de. **Guia cartas geotécnicas: orientações básicas aos municípios**. São Paulo: IPT, 3Mb, PDF (IPT. Publicação 3022) (livro eletrônico). 2015.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012**. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Diário Oficial da União 2012.

BRASIL. "**Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a política nacional de proteção e defesa civil-PNPDEC; dispõe sobre o sistema nacional de proteção e defesa civil-SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil-CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres". Diário Oficial da União. 2012.

BRASIL. **Medida Provisória nº. 547 de 11 de outubro de 2011**. Altera a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979; a Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, e a Lei nº 12.340, de 1º de dezembro de 2010. Diário Oficial da União. 2011.

BRITO, Mariana Madruga de. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS**. 2014.

BRITO, Mariana Madruga de; WEBER, Eliseu José; PASSUELLO, Alexandra. **Avaliação multicritério aplicada ao mapeamento a suscetibilidade a escorregamentos: o caso do Bairro Cascata, Porto Alegre, RS**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 10, n. 03, p. 735-749, 2017.

CARVALHO, Júlia Bruno. **Análise da setorização de fatores de predisposição derivados topograficamente na modelagem estatística de susceptibilidade a escorregamentos: estudo de caso na região de Jequeri, Minas Gerais**. 2021. 38 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

CEPED/UFSC - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012: volume Brasil.** Universidade Federal de Santa Catarina. 2013.

CEPED/UFSC - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina. "**Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995–2014.**" Banco Mundial Florianópolis. 2016.

COROMINAS, J., VAN WESTEN, C., FRATTINI, P., CASCINI, L., MALET, J. P., FOTOPOULOU, S. & SMITH, J. T. **Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of engineering geology and the environment.** v. 73, n. 2, p. 209-263, 2014.

CRUDEN, D. M., KRAUTER, E., BELTRAN, L., LEFEBVRE, G., & TER-STEPANIAN, G. I. **Describing landslides in several languages: the multilingual landslide glossary.** In International congress International Association of Engineering Geology. 1994.

DEN ECKHAUT VAN, REICHENBACH P, GUZZETTI F, ROSSI M, POESEN J. **Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium.** Nat Hazards Earth Syst Sci 9:507–521. 2009.

EIRAS, C. G. S. Mapeamento da suscetibilidade a eventos perigosos de natureza geológica e hidrológica em São Carlos-SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2017.

FAYEZ, Laila et al. **Application of frequency ratio model for the development of landslide susceptibility mapping at part of Uttarakhand State, India.** Int. J. Appl. Eng. Res, v. 13, n. 9, p. 6846-6854, 2018.

FELL, R., COROMINAS, J., BONNARD, C., CASCINI, L., LEROI, E., & SAVAGE, W. Z. **Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning.** Engineering Geology, 102(3-4), 99-111. 2007.



FIALHO, Edson Soares. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte: Caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2019.

GABELINI, Beatriz Marques. **Suscetibilidade a escorregamentos na região entre Caraguatatuba e São Sebastião (SP): análise fisiográfica e quantitativa**. 2017.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo. Editora Edgard Blücher. 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de Escavação. 2º Edição**. São Paulo. Editora Edgard Blücher, 1984.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. **Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy**. *Geomorphology*, 31: 181-216. 1999.

HODASOVÁ, Kamila; BEDNARIK, Martin. **Effect of using various weighting methods in a process of landslide susceptibility assessment**. *Natural Hazards*, v. 105, n. 1, p. 481-499, 2021.

HUANG, Faming et al. **Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping**. *Catena*, v. 191, p. 104580, 2020.

JORGE, Celeste. **Metodologia heurística e holística para a definição da suscetibilidade à instabilização de encostas com ocupação urbana**. Ponta Delgada, 2018.

JULIEV, Mukhiddin et al. **Comparative analysis of statistical methods for landslide susceptibility mapping in the Bostanlik District, Uzbekistan**. *Science of the total environment*, v. 653, p. 801-814, 2019.

JUNQUEIRA, Adriano M. et al. **Landslide susceptibility mapping for transmission lines: dynamic monitoring, analysis and alerts for extreme natural events**. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, n. 1, p. 1-18, 2020.

KAB, Amel et al. **Landslide Susceptibility Assessment Using Statistical Multivariate Analysis “PCA” in the Mediterranean Kabylia**. 2021.

KAVZOGLU, Taskin; SAHIN, Emrehan Kutlug; COLKESEN, Ismail. **An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district.** *Natural Hazards*, v. 76, n. 1, p. 471-496, 2015.

LOMBARDO, Luigi et al. **Space-time landslide predictive modelling.** *Earth-Science Reviews*, p. 103318, 2020.

LOMBARDO, Luigi; TANYAS, Hakan. **Chrono-validation of near-real-time landslide susceptibility models via plug-in statistical simulations.** *Engineering Geology*, v. 278, p. 105818, 2020.

METEN, Matebie; PRAKASHBHANDARY, Netra; YATABE, Ryuichi. **Effect of landslide factor combinations on the prediction accuracy of landslide susceptibility maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia.** *Geoenvironmental Disasters*, v. 2, n. 1, p. 1-17, 2015.

MUNDIAL, BM–Banco. "MI–Ministério da Integração Nacional, SEDEC–Secretaria Nacional de Defesa Civil (2012). **“Entendendo o risco Brasil 2012.”** Belo Horizonte. 2012. Disponível em: [www.understandingrisk.org/URBR](http://www.understandingrisk.org/URBR). Acesso em 26/11/2019.

MYRONIDIS, Dimitrios; PAPAGEORGIOU, Charalambos; THEOPHANOUS, Stavros. **Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP).** *Natural Hazards*, v. 81, n. 1, p. 245-263, 2016.

NAVES, Fernando Esteves; ALMEIDA, Rherison Tyrone Silva. **Índice Topográfico De Umidade Como Método Para Identificação De Pontos De Alagamento Em Áreas Urbanas.** *Sociedade e Território*, v. 33, n. 1, p. 209-227, 2021

NGUYEN, Thi To Ngan; LIU, Cheng-Chien. **A new approach using AHP to generate landslide susceptibility maps in the Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan.** *Sensors*, v. 19, n. 3, p. 505, 2019.

OLIVEIRA, S.; PILLOTI, E.; LEÃO, G.; SELLITTO, M. **Metodologia para avaliação de desempenho ambiental em fabricação utilizando um método de apoio à decisão multicriterial.** *Estudos tecnológicos*, v.1, n.2, p.21-29, 2005.

OZTURK, U., PITTORE, M., BEHLING, R., ROESSNER, S., ANDREANI, L., & KORUP, O. **How robust are landslide susceptibility estimates?.** *Landslides*, 1-15. 2020.

REICHENBACH P, ROSSI M, MALAMUD BD, MIHIR M, GUZZETTI. **A review of statistically-based landslide susceptibility models.** EarthSci Rev 180:60–91. 2018.

PARK, Soyoung et al. **Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea.** Environmental earth sciences, v. 68, n. 5, p. 1443-1464, 2013.

PIRES, C. Q. **A importância da cartografia temática na visualização e análise geográfica de dados socioeconômicos.** Salão de Iniciação Científica (22.: 2010 out. 18-22: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS. 2010.

PRANDINI, F. L.; FREITAS, C. G. L.; NAKAZAWA, V. A. **A cartografia geotécnica na prevenção e mitigação dos impactos ambientais.** Anu. Inst. Geocienc. 15: 173-180. 1992.

QUEIROGA, G. N. et al. **Mapa Geológico Jequiri - Folha SF-23-X-B-II-4. Na escala 1:50.000.** Universidade Federal de Minas Gerais/ Serviço Geológico do Brasil – CPRM. RAJA, N. B. et al. **Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model.** Nat Hazards, 2011.

RIFFEL, E. S. **Metodologias para mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de massa.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ Instituto de Geociência. Porto Alegre, p. 125. 2017.

ROCHA, Brenda Oliveira. **Análise multicritério em sinergia com a álgebra de mapas para avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa no Maciço de Baturité.** 2021.

ROSA, M. L. **Cartografia de suscetibilidade a deslizamentos utilizando o método estatístico de Valor Informativo: Estudo de caso na bacia do Ribeirão dos Macacos, Nova Lima/MG.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 72. 2018.

RUFF, M.; CZURDA, K. **Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria).** Geomorphology, v. 94, n. 3-4, p. 314-324, 2008.

SAATY, Thomas L. **A scaling method for priorities in hierarchical structures.** Journal of mathematical psychology, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977.

SAITO, Silvia. **Estudo analítico da suscetibilidade a escorregamentos e quedas de blocos no Maciço Central de Florianópolis-SC**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-graduação em Geografia. 2004.

SHAHABI, H.; AHMAD, B. B.; KHEZRI, S. **Evaluation and comparison of bivariate and multivariate statistical methods for landslide susceptibility mapping (case study: Zab basin)**. Arabian journal of geosciences, v. 6, n. 10, p. 3885-3907, 2013.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. de. **Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 2, p. 79-97, 2012.

TEKNOMO, K. **Analytic hierarchy process (AHP) tutorial**. 2006.

VAN DEN EECKHAUT, M., MOEYERSONS, J., NYSSSEN, J., ABRAHA, A., POESEN, J., HAILE, M., & DECKERS, J. **Spatial patterns of old, deep-seated landslides: A case-study in the northern Ethiopian highlands**. Geomorphology, 105(3-4), p. 239-252. 2009.

VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. 1984.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. Special report, v. 176, p. 11-33. 1978.

VORPAHL, Peter et al. **How can statistical models help to determine driving factors of landslides?** Ecological Modelling, v. 239, p. 27-39, 2012.

YALCIN, Ali. **GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations**. catena, v. 72, n. 1, p. 1-12, 2008.