UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

PÂMELA REGINA SANTOS

MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO SILVA, MACEIÓ, ALAGOAS

RIO LARGO, AL
SETEMBRO, 2025

PÂMELA REGINA SANTOS

MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO SILVA, MACEIÓ, ALAGOAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Agrimensura.

Orientador: Profº Dr. Jhonathan Gomes dos Santos

RIO LARGO, AL

SETEMBRO, 2025

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 – 1512

S237m Santos, Pâmela Regina.

Mapeamento de suscetibilidade à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa na bacia hidrográfica do riacho do Silva, Maceió, Alagoas. / Pâmela Regina Santos. – 2025.

68 f.: il.

Orientador(a): Jhonathan Gomes dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em) – Graduação em Engenharia de Agrimensura, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Vulnerabilidade. 2.Análise de risco. 3. Gestão territorial. 4. Classificação supervisionada. I. Título.

CDU: 528.4: 556.16(813.5)

FOLHA DE APROVAÇÃO

PÂMELA REGINA SANTOS

MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO SILVA, MACEIÓ, ALAGOAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Agrimensura da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Agrimensura.

Aprovado em: 30/10/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br JHONATHAN GOMES DOS SANTOS
Data: 11/11/2025 14:45:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador - Dr. Jhonathan Gomes Dos Santos
Campus de Engenharia e Ciências Agrárias
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
gov.br REGLA TOUJAGUEZ LA ROSA MASSAHUD
Data: 11/11/2025 07:57:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Examinadora Interna– Dra. Regla Toujaguez La Rosa Massahud
Campus de Engenharia e Ciências Agrárias
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
gov.br VALDENY CAROLINE DE VASCONCELOS LIMA
Data: 10/11/2025 15:07:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Examinadora Externa- Msc. Valdeny Caroline de Vasconcelos Lima
AGILE Soluções & Engenharia
Engenheira Agrimensora

AGRADECIMENTOS

Conseguimos! Chegamos ao final dos seis anos mais longos, trabalhosos e gratificantes. Sim, “conseguimos” no plural. Agradeço a Deus, à minha mãe, Rosimeyre, que sempre esteve presente, torcendo e vibrando com meus passos, e à minha família, especialmente às minhas tias, Rosângela e Rosileide, que são grandes amigas e pilares fortes, sendo a base durante todos esses anos. Esta conquista não é só minha, mas nossa! Obrigada por me amarem, me ensinarem a esperar e a confiar nos planos de Deus para minha vida.

Agradeço ao meu amigo Arrysson que sempre me impulsionou a dar o meu melhor. Por me apoiar, pela bondade, empatia e por estar ao meu lado nas fases difíceis da universidade e da vida. Obrigada por iniciar, terminar e continuar ao meu lado. Você foi essencial para essa formação.

Expresso minha eterna gratidão à Profª. Drª. Regla Toujaguez, que me acolheu desde o primeiro período, quando eu já estava desesperada com a matéria de Estatística, permaneceu ao meu lado com seu cuidado e ajuda para que eu chegasse até aqui. Agradeço também ao Profº. Dr. Jhonathan Gomes, que aceitou o desafio de ser meu orientador, pela orientação e por compartilhar seu conhecimento na execução desta proposta metodológica.

Registro minha sincera gratidão à Defesa Civil de Maceió pela disponibilização dos dados de localização dos deslizamentos ocorridos dentro do limite da bacia, os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Para concluir, deixo aqui meus sinceros agradecimentos a todos que fizeram parte deste ciclo e que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Obrigada, Luana, Fernandja, Viviele, Sara, Dona Berlange, Enrique e Wellington, por me acolherem de forma inigualável nos últimos períodos. E, em especial, ao Ícaro, pelo apoio, pela ajuda constante e pela compreensão nos meus momentos mais difíceis.

A vocês, minha eterna gratidão! ♡

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo aplicado à Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, em Maceió/AL, com foco na avaliação da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, fenômenos caracterizados pelo desprendimento de solo, rochas e detritos que afetam áreas urbanas e provocam danos ambientais, sociais e econômicos. O município de Maceió apresenta como realidade um processo de urbanização acelerada e a ausência de planejamento urbano que potencializam os problemas socioambientais. Nesse sentido, o trabalho tem como objetivo mapear as áreas propensas a esses eventos por meio da aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), integrando variáveis físicas e morfométricas em ambiente SIG. A metodologia contemplou a aquisição de dados cartográficos, sensoriamento remoto, processamento em *QGIS*, geração de mapas temáticos e registros fotográficos de campo para auxiliar na validação dos critérios adotados. A hierarquia de decisão do AHP permitiu atribuir pesos relativos aos fatores condicionantes e integrar as variáveis em álgebra de mapas para a produção do modelo final. A validação do mapa de suscetibilidade ocorreu por meio do inventário de deslizamentos fornecido pela Defesa Civil de Maceió possibilitando à aplicação da curva ROC-AUC, resultando em um desempenho aceitável, o que confirmou a consistência do modelo. Os resultados evidenciaram que uma parte da área da bacia apresenta suscetibilidade classificada como alta ou muito alta, com destaque para os bairros Petrópolis, Chã da Jaqueira e Chã do Bebedouro, onde a declividade acentuada, associada a cortes de taludes, ocupações irregulares e remoção da cobertura vegetal, intensifica os perigos. O estudo concluiu que o mapeamento de suscetibilidade se mostrou uma ferramenta eficaz para identificar áreas críticas e subsidiar o planejamento urbano e ambiental, reforçando a aplicabilidade do AHP como técnica de suporte à gestão de riscos geológicos. A análise confirmou que intervenções antrópicas aumentam significativamente a vulnerabilidade das encostas, sendo urgente a adoção de medidas estruturais, e não estruturais. Assim, o trabalho evidencia que a integração de métodos multicritério com dados geoespaciais representa uma estratégia eficiente e replicável para o monitoramento e mitigação de desastres em áreas urbanas vulneráveis.

Palavras-chaves: Vulnerabilidade; Análise de risco; Gestão territorial; Classificação supervisionada.

ABSTRACT

This paper presents a study applied to the Riacho do Silva River Basin in Maceió, Alagoas, focusing on assessing susceptibility to gravitational mass movements, phenomena characterized by the detachment of soil, rocks, and debris that affect urban areas and cause environmental, social, and economic damage. The municipality of Maceió is undergoing rapid urbanization and lacks urban planning, which exacerbates socio-environmental problems. In this sense, the study aims to map areas prone to these events by applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, integrating physical and morphometric variables in a GIS environment. The methodology included the acquisition of cartographic data, remote sensing, processing in QGIS, generation of thematic maps, and photographic field records to assist in the validation of the criteria adopted. The AHP decision hierarchy allowed relative weights to be assigned to the conditioning factors and the variables to be integrated into map algebra to produce the final model. The susceptibility map was validated using the landslide inventory provided by the Civil Defense of Maceió, enabling the application of the ROC-AUC curve, resulting in acceptable performance, which confirmed the consistency of the model. The results showed that part of the basin area has a susceptibility classified as high or very high, especially in the neighborhoods of Petrópolis, Chã da Jaqueira, and Chã do Bebedouro, where steep slopes, associated with slope cuts, irregular occupations, and removal of vegetation cover, intensify the dangers. The study concluded that susceptibility mapping proved to be an effective tool for identifying critical areas and supporting urban and environmental planning, reinforcing the applicability of AHP as a technique to support geological risk management. The analysis confirmed that anthropogenic interventions significantly increase the vulnerability of slopes, making it urgent to adopt structural and non-structural measures. Thus, the study shows that the integration of multi-criteria methods with geospatial data represents an efficient and replicable strategy for monitoring and mitigating disasters in vulnerable urban areas.

Keywords: Vulnerability; Risk analysis; Territorial management; Supervised classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Vista aérea da região do Bebedouro no início do século XX 15
Figura 2 - Rua Prefeito Joatas Malta de Alencar, Chã da Jaqueira..... 16
Figura 3 - Perfil de formações geológicas dos bairros Pinheiro e Mutange 21
Figura 4 - Exemplos de variação da declividade 22
Figura 5 - Principais formas de relevo..... 22
Figura 6 - Representação matricial da orientação da vertente 23
Figura 7 - Representação das curvaturas e das diferentes formas do terreno 24
Figura 8 - Avenida Empresário Jorge Montenegro de Barros, 86, Santa Amelia..... 25
Figura 9 - Ocorrência de deslizamento na BHRS..... 26
Figura 10 – Desmatamento e Construções em área de risco 28
Figura 11 - Exemplo da etapa de Estruturação Hierárquica 31
Figura 12 - Área de estudo..... 34
Figura 13 - Procedimentos metodológicos..... 35
Figura 14 - Fluxo de modelo hierárquico de decisão..... 40
Figura 15 - Mapa de Hipsometria 43
Figura 16 - Mapa de declividade 44
Figura 17 – Mapa de orientação das vertentes..... 45
Figura 18 - Mapa da Curvatura Horizontal..... 46
Figura 19 – Mapa da Curvatura Vertical 47
Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo da BHRS..... 48
Figura 21 - Presença de corpo hídrico 50
Figura 22 - Mapa de Litologia 51
Figura 23 – Mapa de influência da drenagem..... 52
Figura 24 - Deslizamento de massa 55
Figura 25 - Deslizamento de massa 55
Figura 26 - Mapa de suscetibilidade 56
Figura 27 - Inventário de Movimentos Gravitacionais de Massa..... 59
Figura 28 - Inventário de deslizamento MGM 60
Figura 29 - ROC - AUC..... 61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação Brasileira de Desastre 16
Quadro 2 - Classificação dos MGM, conforme Augusto Filho (1992). 18
Quadro 3 - Indicadores de suscetibilidade utilizados nos últimos anos 20
Quadro 4 - Principais formas de relevo 23
Quadro 5 - Conceitos para a análise de área de risco 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala com valores de intensidade utilizada na análise 32
Tabela 2 - Classes do relevo 37
Tabela 3 - Definição das classes de uso e cobertura do solo 39
Tabela 4 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n 41
Tabela 5 - Classes de Declividade 44
Tabela 6 - Classes de Orientação das Vertentes 46
Tabela 7 - Classes da Curvatura Horizontal 47
Tabela 8 – Classes da Curvatura Vertical 48
Tabela 9 - Matriz de confusão 49
Tabela 10 - Classes de Uso e ocupação do solo 49
Tabela 11 - Classes de Litologia 51
Tabela 12 – Classes influência da drenagem 52
Tabela 13 - Matriz de comparação pareada 53
Tabela 14 – Obtenção dos pesos 53
Tabela 15 - Pontos visitados 54
Tabela 16 - Classificação do grau de suscetibilidade a MGM 57
Tabela 17 - Grau de Suscetibilidade para cada bairro da BHRS 58

LISTA DE SIGLAS

AHP	*Analytic Hierarchy Process*
APP	Área de Preservação Permanente
AUC	*Area Under the Curve*
BHRS	Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva
CBERS	*China-Brazil Earth Resources Satellite*
CELMM	Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú–Manguaba
COBRADE	Classificação e Codificação Brasileira de Desastre
COMPDEC	Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IC	Índice de Consistência
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IR	*Random Index*
MDE	Modelo Digital de Elevação
MGM	Movimento de Massa Gravitacional
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PMRR	Plano Municipal de Redução de Risco
RC	Razão de Consistência
ROC	*Receiver Operating Characteristic*
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SP	São Paulo
TIN	*Triangulated Irregular Network*
UM-ISDR	*International Strategy for Disaster Reduction*
UNDRR	*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **13**

2 OBJETIVOS **14**

2.1 Geral **14**

2.2 Específicos **14**

3 REFERENCIAL TEÓRICO **15**

3.1 Processo de Urbanização **15**

3.2 Desastres **16**

3.3 Movimentos Gravitacionais de Massa e classificações **17**

3.3.1 Rastejo *(CREEP)* 18

3.3.2 Escorregamentos *(SLIDES)* 19

3.3.3 Quedas *(FALLS)* 19

3.3.4 Corridas *(FLOWS)* 19

3.4 Deflagrador e condicionantes **19**

3.4.1 Condicionantes geológicos 20

3.4.2 Condicionantes morfométricos 22

3.4.3 Condicionantes antrópicos 24

3.5 Histórico de eventos na Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, Maceió **26**

3.6 Análises de risco **27**

3.7 Mudanças climáticas x eventos extremos no Brasil (últimos 5 anos) **28**

3.8 Suscetibilidade a MGM **29**

3.9 Avaliação de suscetibilidade **29**

3.10 *Analytic Hierarchy Process (AHP)* **30**

3.10.1 Estruturação da hierarquia 30

3.10.2 Matriz de comparação par a par 31

3.10.3 Autovetor 32

3.10.4 Análise de consistência 32

4 MATERIAIS E MÉTODOS 34

4.1 Área de estudo 34

4.2 Metodologia 35

4.2.1 Aquisição dos dados 36

4.2.2 Processamento dos dados em ambiente sig 36

4.2.3 Definição dos indicadores e geração dos mapas temáticos 36

4.2.4 Mapa de atitude (hipsometria) 36

4.2.5 Mapa de declividade 36

4.2.6 Orientação das vertentes 38

4.2.7 Mapa de curvatura horizontal 38

4.2.8 Mapa de curvatura vertical 38

4.2.9 Mapa de uso e ocupação 38

4.2.10 Classificação do uso e cobertura da terra utilizando *Random Forest* 39

4.2.11 Mapa de litologia 39

4.2.12 RMapa de distância a rede de drenagem 39

4.3 Aplicação do método AHP 39

4.3.1 Estruturação da hierarquia de decisão 39

4.3.2 Matriz de comparação par a par e obtenção dos pesos 40

4.3.3 Teste de consistência lógica 40

4.4 Registros de campo 41

4.5 Geração do Mapa de Suscetibilidade e Validação 41

4.5.1 Álgebra de mapas e soma ponderada 41

4.5.2 Classificação e validação do modelo 42

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 43

5.1 Condicionantes Morfométricos 43

5.2 Condicionantes Antrópicos 48

5.3 Condicionantes Geológicos 50

5.4 Matriz par a par AHP 53

5.5 Registro de campo 54

5.6 Mapa de suscetibilidade da área da BHRS 56

5.7 Validação do Modelo 58

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 62

7 REFERÊNCIAS 63

1 INTRODUÇÃO

Os Movimentos Gravitacionais de Massa (MGM) são definidos como desastres geológicos caracterizados pelo deslocamento de rochas, detritos ou solo ao longo de encostas, podendo causar danos sociais e econômicos (TOMINAGA, 2007). No contexto brasileiro, a frequência desses eventos tem aumentado, provocada por fatores climáticos e ações antrópicas, como o desmatamento, corte de encosta para construções e a ocupação irregular em áreas de risco (ARAÚJO, 2023).

Esse cenário se agrava diante de estudos que evidenciam como o uso e a ocupação do solo em áreas urbanas brasileiras ocorrem, em grande parte, sem planejamento adequado, comprometendo a dinâmica natural do ambiente e aumentando a exposição da população a eventos extremos (CONCEIÇÃO, 2023). Essa realidade é reforçada por dados globais da ONU (2023), segundo os quais, entre 1970 e 2021, foram registrados cerca de 11.778 desastres climáticos e geológicos, sendo que 90% das vítimas estavam em países em desenvolvimento, como o Brasil.

Nesse contexto de vulnerabilidade, o país se destaca como um dos países mais afetados, possui cerca de 6.880 setores precários e 3,1 milhões de assentamentos irregulares, onde cerca de 12,4 milhões de pessoas estão expostas a riscos (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2023).

No contexto local, o município de Maceió apresenta um processo de urbanização acelerada e ausência de planejamento urbano, fatores que potencializam os problemas socioambientais, especialmente na Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva (BHRS) (LIMA, 2013). Nessa área, problemas como assoreamento, contaminação por resíduos sólidos e lançamento de esgoto, contribuem para o aumento da vulnerabilidade a inundações e deslizamentos (NASCIMENTO JÚNIOR *et al.*, 2004). Como exemplo temos a enchente ocorrida em abril de 2021, quando um volume de 132,8 mm de chuva, em 48 horas, provocou danos significativos em zonas suscetíveis a MGM (GAMA; FALCÃO, 2023).

Diante dessa realidade, o mapeamento de suscetibilidade surge como ferramenta fundamental para identificar áreas propensas à ocorrência de MGM, auxiliando a gestão de riscos geológicos, sobretudo em ambientes urbanos (ARAÚJO, 2023). Nesse sentido, este estudo teve como objetivo aplicar o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para identificar e classificar áreas de risco na BHRS, considerando parâmetros como declividade, orientação das vertentes e uso e ocupação do solo, definidos a partir de revisão bibliográfica e das características locais. A escolha metodológica possibilitou a classificação dos fatores determinantes e a elaboração de um mapa de suscetibilidade, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento ambiental e a mitigação de riscos em escala regional.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Mapear as áreas propensas a MGM na BHRS, Maceió/AL, mediante análise multicritério pelo método AHP, considerando variáveis físicas (geologia) e morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvatura do terreno) uso do solo e influência da hidrografia.

2.2 Específicos

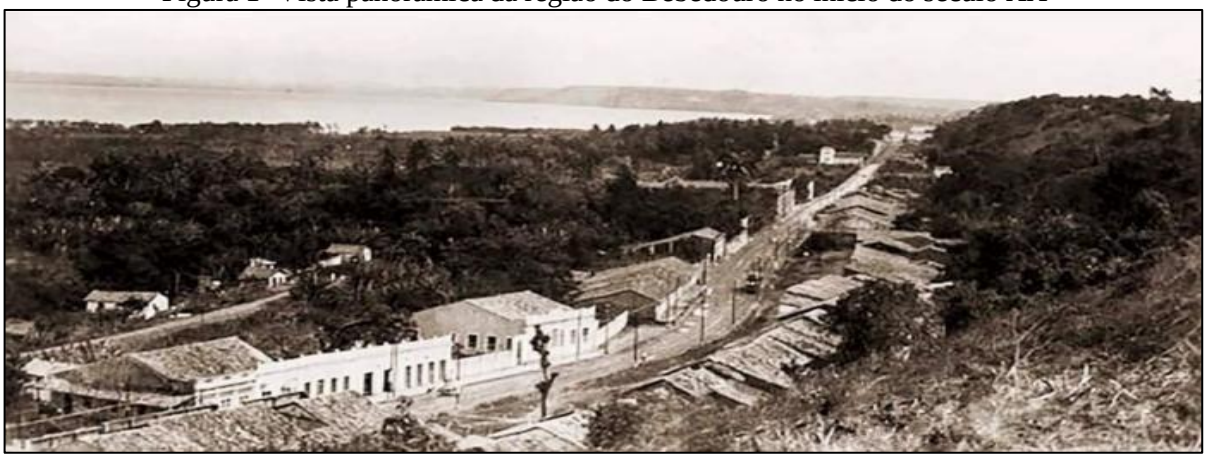
- ✓ Integrar os fatores ponderados em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para gerar um mapa de suscetibilidade a MGM;
- ✓ Classificar as áreas de suscetibilidade em categorias (Baixa, Média, Alta e Muito Alta) com base nos valores obtidos no modelo;
- ✓ Validar mapeamento da suscetibilidade a MGM.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Processo de Urbanização

A cidade de Maceió surgiu no final do século XVIII, a partir do engenho “Massayo”, termo de origem tupi-guarani, e de um riacho que corria próximo, que juntos deram nome à capital alagoana (OLIVEIRA, 2018). Inicialmente voltada à produção de açúcar, a cidade expandiu-se por meio do comércio, impulsionada pela atividade portuária do Jaraguá (FREITAS, 2022). O crescimento urbano ocorreu primeiro no centro e, posteriormente, em áreas como o bairro Bebedouro, conforme ilustra a Figura 1 (CAMPELLO, 2009).

Figura 1- Vista panorâmica da região do Bebedouro no início do século XX



Fonte: Freitas (2022)

Conforme ilustrado na Figura 1, Bebedouro, um dos bairros mais antigos da cidade, era habitado por moradores de alta sociedade. No entanto, assim como ocorreu em outros centros urbanos do país, a área passou por um crescimento acelerado e desorganizado (LEMOS, 2003).

A partir da década de 1970 esse crescimento populacional foi intensificado pelo êxodo rural, resultando na ocupação de áreas ambiental e geologicamente suscetíveis, inclusive em regiões da planície flúvio-lagunar. Sendo essas zonas classificadas como áreas de risco geológico, conforme aponta o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), que permanece desatualizado desde 2007 (MASSAHUD; SILVA; CAMPOS, 2024).

Com o crescimento urbano, moradores de maior renda migraram para o bairro do Farol, o que contribuiu para a desvalorização de áreas como Bebedouro. Paralelamente, o deslocamento populacional intensificou a ocupação dessa região por famílias de baixa renda, especialmente em locais como Chã de Bebedouro e Chã da Jaqueira (Figura 2) (FARIA; CAVALCANTI, 2009).

Figura 2 - Rua Prefeito Joatas Malta de Alencar, Chã da Jaqueira



Fonte: Autora (2025)

Atualmente, essa área (Figura 2) enfrenta diversos problemas, como risco de deslizamentos, enchentes, poluição de córregos e dificuldades de mobilidade urbana. A combinação entre topografia acidentada e ocupação por populações vulneráveis agrava os impactos de desastres, especialmente durante os períodos de chuvas intensas (FREITAS, 2022).

3.2 Desastres

Desastre é uma grave interrupção no funcionamento de uma comunidade ou sociedade, ocasionando em perdas humanas, ambientais ou materiais significativos, tendo efeitos que superam a capacidade da população afetada de lidar com a situação utilizando seus próprios recursos (UNDRR, 2025). A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), divide os desastres em cinco grupos, sendo eles os geológicos, hidrológicos, meteorológicos, climatológicos e biológicos (JANAÍNA FURTADO *et al.*, 2012). Conforme mostra o Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 - Classificação Brasileira de Desastre

Tipo de desastres	**Exemplos**
Geológicos	Terremoto, emanação vulcânica, movimento de massa e erosão.
Hidrológicos	Inundações, enxurradas e alagamentos.
Meteorológicos	Sistemas de grande escala/ escala regional, tempestades, tempestades extremas.
Climatológicos	Seca.
Biológicos	Epidemias e infestações/pragas.

Fonte: Adaptado de Furtado *et al*., (2012)

Embora a palavra seja geralmente associada a eventos de grande escala, como terremotos, tsunamis, ciclones e furacões, os desastres citados no Quadro 1 englobam processos e ocorrências de menor escala, como MGM, alagamentos, subsidências e processos erosivos (NOBRE; MARENGO, 2017).

Observa-se, de forma geral, um aumento nas ocorrências desses eventos, tanto em razão da intensificação de eventos geodinâmicos, hidrometeorológicos e climáticos em determinadas regiões do país, quanto pelo crescimento da vulnerabilidade ambiental (REDIN VESTENA *et al.*, 2024).

3.3 Movimentos Gravitacionais de Massa e classificações

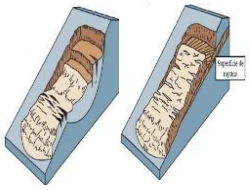
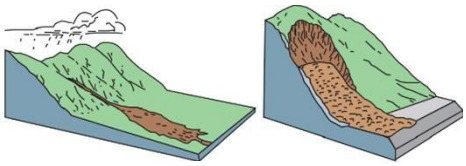
Tominaga (2007) declara que o MGM é o deslocamento de solo, rocha ou vegetação ao longo da encosta, impulsionado pela gravidade e a presença de água, que contribui para o movimento acontecer ao reduzir a resistência dos materiais, deixando o solo mais plástico e fluido, assim, facilitando o deslocamento. Os escorregamentos, ou deslizamentos, são termos utilizados frequentemente para os MGM, e seu deslocamento apresenta sentido para baixo e para fora da encosta (VARNES, 1978).

Segundo o IPT (2018), esses fenômenos podem ser por ações humanas que alteram as condições naturais do terreno, como cortes de taludes para construção de habitações, aterros, implantação de estradas e outras obras.

De acordo com Oliveira (2022), existem diversas classificações para os MGM, uma vez que, esses fenômenos abrangem diferentes tipos de materiais e maneiras de deslocamentos. Ao longo dos anos, diferentes autores desenvolveram e sugeriram estruturas de classificação para os MGM como Varnes (1978) e Augusto Filho (1992). Para Augusto Filho (1992) os tipos e processos de deslizamentos podem ser classificados com base em critérios como a natureza dos materiais relacionados e os mecanismos de movimentação. A seguir, mostra-se a caracterização dos tipos de MGM sugeridos por Augusto Filho (1992).

Nesta classificação, os movimentos relacionados às encostas são divididos em quatro categorias de processos: rastejo, escorregamento, quedas e corridas que representam os tipos de MGM mais frequentes no Brasil, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos MGM, conforme Augusto Filho (1992).

Processos	**Características do movimento/material/geometria**
Rastejo *(CREEP)* 	Movimento muito lento, velocidade decrescente, material envolvido e Geometria complexa e indefinida.
Escorregamentos *(SLIDES)*  Rotacional Translacional	Velocidades médias a altas: Circulares / Rotacionais: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; Planares/translacionais: solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza. Em cunha: solos e rochas com 2 planos de frequeza.
Quedas *(FALLS)* 	Movimento livre, velocidade muito alta, material rochoso e geometria variável.
Corridas *(FLOWS)*  Fluxo de lama Avalanche de detritos	Comportamento fluido, trajeto controlado pela drenagem, alta velocidade e mobilidade, material heterogêneo e elevado potencial destrutivo.

Fonte: Adaptado de Bezerra (2019)

A seguir, apresenta-se uma breve explicação sobre as formas de atuação dos movimentos, conforme ilustrado no Quadro 2.

3.3.1 Rastejo *(CREEP)*

Conforme Tominaga (2007), refere-se a movimentos de massa lentos e contínuos em encostas, com transições dispersas entre áreas estáveis e móveis. Esse processo resulta da ação

gravitacional reforçada por variações de temperaturas e umidades que, ao atingirem a resistência ao cisalhamento, inicia-se o deslizamento.

3.3.2 Escorregamentos *(SLIDES)*

Correspondem a movimentos rápidos de solo ou rocha, delimitados espacialmente e desencadeados pela ação da gravidade. Esses movimentos são classificados em dois tipos principais: escorregamentos rotacionais, caracterizados por rupturas curvas em solos espessos, e escorregamento translacional que envolvem deslizamentos planares em solos sobre rocha.

3.3.3 Quedas *(FALLS)*

Também pode ser chamada de rolamento de blocos, comuns em encostas verticais ou inclinados. Ela acontece quando blocos de rochas se soltam e caem geralmente em queda livre de forma repetitiva (GERSCOVICH, 2016).

3.3.4 Corridas *(FLOWS)*

As corridas de lama, ou fluxos de detritos, são movimentos rápidos, marcados pela mobilização de grandes volumes de material que podem alcançar longas distâncias, inclusive em áreas planas (SIDLE; OCHIAI, 2006), como ilustrado no Quadro 2.

Por fim, as avalanches de detritos são definidas como fluxos rápidos ou extremamente rápidos, envolvendo sedimentos, solo, rochas e vegetação, parcial ou totalmente saturados. Esses movimentos ocorrem em encostas íngremes, nas quais o ângulo de inclinação é um fator determinante para sua deflagração (HUNGR *et al.*, 2001).

3.4 Processo Deflagrador e condicionantes favoráveis para a ocorrência de MGM

Diversas classificações foram sugeridas para organizar os conjuntos de causas ou fatores condicionantes à ocorrência de MGM, com base na origem dos fatores físicos e nas causas imediatas responsáveis pela instabilização das encostas (SCHRAMM; OSAKO, 2023). Tominaga (2007) destaca que as repetições desses eventos são compostas por fatores condicionantes de origem tanto natural quanto antrópica. Dessa forma, torna-se fundamental entender os principais indicadores que podem provocar os MGM.

O Quadro 3 apresenta alguns indicadores utilizados em estudos sobre a suscetibilidade à MGM ao longo dos últimos anos.

Quadro 3 - Indicadores de suscetibilidade utilizados nos últimos anos

Autores	Indicadores
Meirelles, Dourado, Costa (2018)	Declividade, Uso e Cobertura do solo, Forma do Terreno, Prox. a Estradas, Prox. a Drenagens, Geologia, Pedologia, Form. Superficial, Morf. Relevo, Orientação
Achour, Pourghasemi (2020)	Elevação, Declividade, Orientação, Curvatura em planta, Curvatura em perfil, SPI, TWI, Litologia, NDVI
Zhang *et al.*, (2022)	Litologia, Uso e Cobertura do solo, Declividade, Temperatura média anual, Precipitação média anual, Aridez, Índice de umidade (IM), População, Intensidade da atividade humana da superfície terrestre (HAILS), NDVI, Distância do eixo anticlinal, Distância do eixo sinclinal, Prox. a Estradas, Prox. a Drenagem, Elevação, Curvatura em perfil, Orientação, Curvatura em planta, TWI, Amplitude de Alívio

Fonte: Adaptado de Araújo (2023)

O Quadro 3, permite classificar os indicadores analisados de suscetibilidade a MGM em condicionantes geológicos, morfométricos e condicionantes antrópicos.

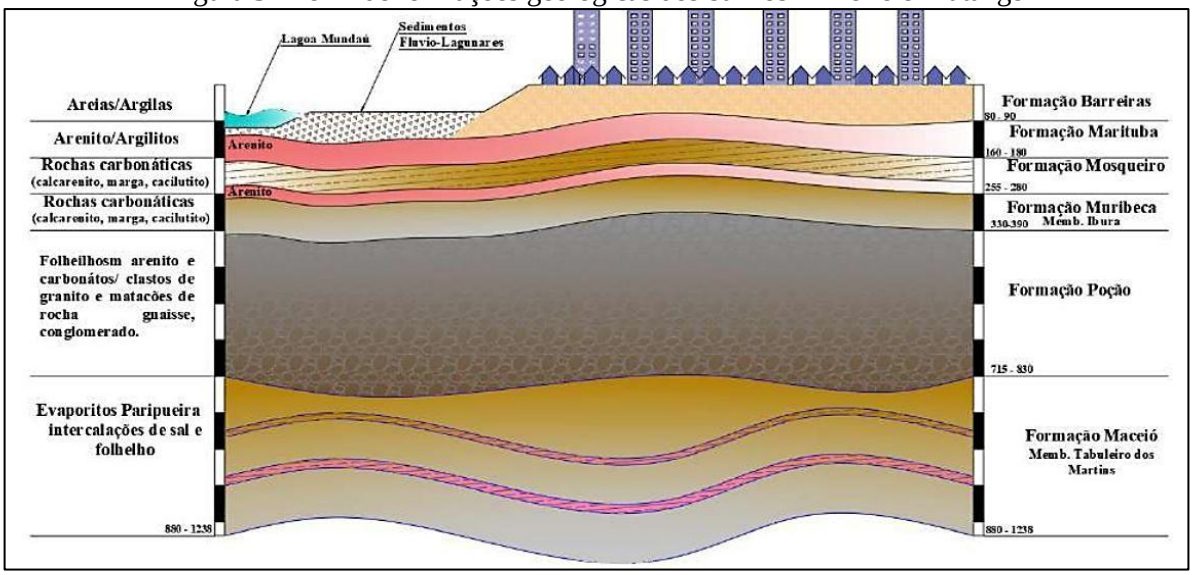
Diante disso, a definição de um conjunto de indicadores configura-se como uma etapa fundamental nas pesquisas voltadas à análise da ocorrência de MGM (BAHRAMI; HASSANI; MAGHSOUDI, 2021). A seguir, apresentam-se os tópicos que descrevem o papel de alguns elementos na ocorrência dos movimentos de massa.

3.4.1 Condicionantes Geológicos

3.4.1.1 Litologia e estruturas geológicas

Litologia, conforme definida por Varnes (1978), refere-se às propriedades dos materiais como composição, textura, estrutura e geometria das rochas (Figura 3), além do impacto de processos tectônicos, intempéricos e erosivos, características que contribuem para a suscetibilidade do terreno aos MGM. Esses elementos modificam a estrutura geológica das rochas, ocasionando fraturas, falhas, planos de acamamento, foliação e dobras, assim, essas estruturas funcionam como fatores predisponentes, pois criam planos de fraqueza que comprometem a estabilidade do terreno (TOMINAGA, 2007).

Figura 3 - Perfil de formações geológicas dos bairros Pinheiro e Mutange



Fonte: Santos (2022)

Conforme Mendes *et al.* (2017) e CPRM (2019), Maceió se encontra na sub-bacia Alagoas e possui sedimentos inconsolidados de origem continental da Formação Barreiras, composta por Arenitos, Argilitos, Siltitos e Conglomerados datados do Neógeno de baixa resistência mecânica.

De acordo com a Figura 3, Santos (2022) destaca que os solos da Formação Barreiras no município de Maceió apresentam características que necessitam de estudos geotécnicos aprofundados, diante da dimensão da sua cobertura. As variações das rochas interferem na permeabilidade e resistência dos solos, causando, movimentos de suscetibilidade do solo (MEZUGHI *et al.*, 2011).

3.4.1.2 Solo

É um corpo natural que recobre parte superficial da crosta. É originado como resultado do processo de intemperismo de rochas. O solo é composto por 45% de minerais, aproximadamente 5% de matéria orgânica e 50% de poros, onde circulam o ar (aproximadamente 25%) e a água (aproximadamente 25%) composto por partes sólidas, líquidas e gasosas, formado por materiais minerais e orgânicos que recobrem a superfície continental (EMBRAPA, 2025).

O processo de evolução dos solos, inicia-se a partir da rocha mãe que corresponde ao horizonte R ainda não afetado pela ação do intemperismo. Com o passar do tempo os minerais das rochas são alterados físico ou quimicamente. A estes novos minerais presentes na fração areia, silte a argila soma-se o acúmulo de material orgânico na superfície, esse material orgânico também se decompõe, contribuindo para a formação dos horizontes do solo (PENA, 2025).

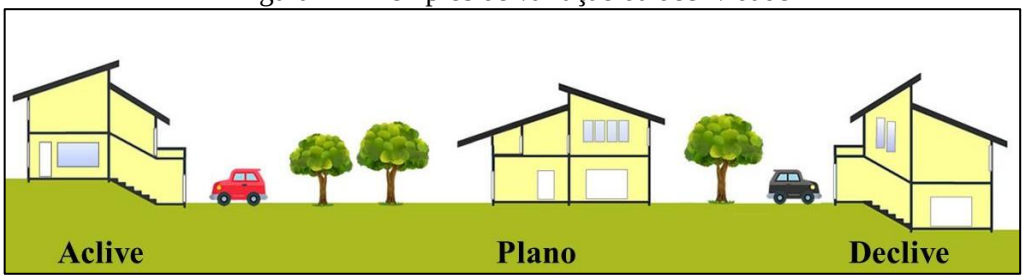
O solo desempenha um papel fundamental na ocorrência de suscetibilidade, pois, quando saturado por água, sofre o aumento da poropressão, favorecendo rupturas em encostas, especialmente em áreas de convergência de fluxos hídricos (FERNANDES *et al.*, 2001).

3.4.2 Condicionantes Morfométricos

3.4.2.1 Declividade

A declividade (Figura 4) diferencia as superfícies planas de relevos mais acentuados (Figura 5), sendo representada pela tangente do ângulo de inclinação do terreno em relação a superfície horizontal, possui influência significativa na ocorrência de suscetibilidade à erosão do solo.

Figura 4 - Exemplos de variação da declividade

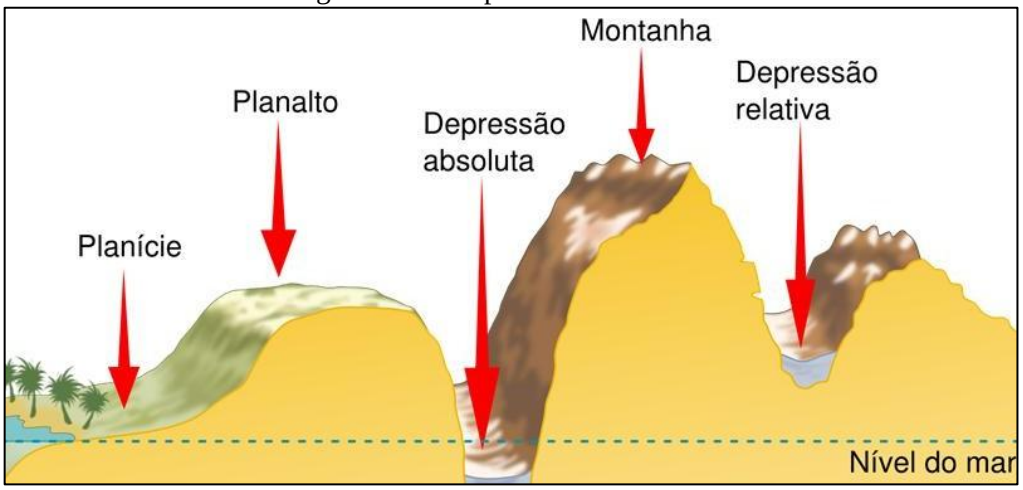


Fonte**:** Adaptado de Portal da Arquitetura (2024)

Conforme ilustrado na Figura 4, o terreno em aclive sobe a partir do nível da rua, o terreno plano caracteriza-se pela ausência de inclinação, já o terreno em declive apresenta uma inclinação descendente em relação ao nível da rua.

Em áreas com menor inclinação, é comum a presença de escorregamentos rotacionais e fluxos de detritos, devido à maior espessura do solo. Já em terrenos mais inclinados, predominam os movimentos rasos, como os escorregamentos translacionais (DOU *et al.*, 2015; IPT, 2018).

Figura 5 - Principais formas de relevo



Fonte: Suporte Geográfico (2025)

Conforme ilustrado na Figura 5, o Quadro 4 apresenta uma breve explicação sobre as principais formas de relevo, de acordo com Tiradentes (2021).

Quadro 4 - Principais formas de relevo

Forma de Relevo	Características principais
Planície	Superfície plana ou suavemente ondulada
Planalto	Área elevada e aplainada, com escarpas e altitudes variadas. Predomínio de erosão.
Depressão	Relevo rebaixado. Divide-se em: •Relativa – mais baixa que as áreas vizinhas; •Absoluta – abaixo do nível do mar. Também pode indicar baixa pressão na meteorologia.
Montanha	Elevação com mais de 3.000 m, declives acentuados e origem tectônica.

Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

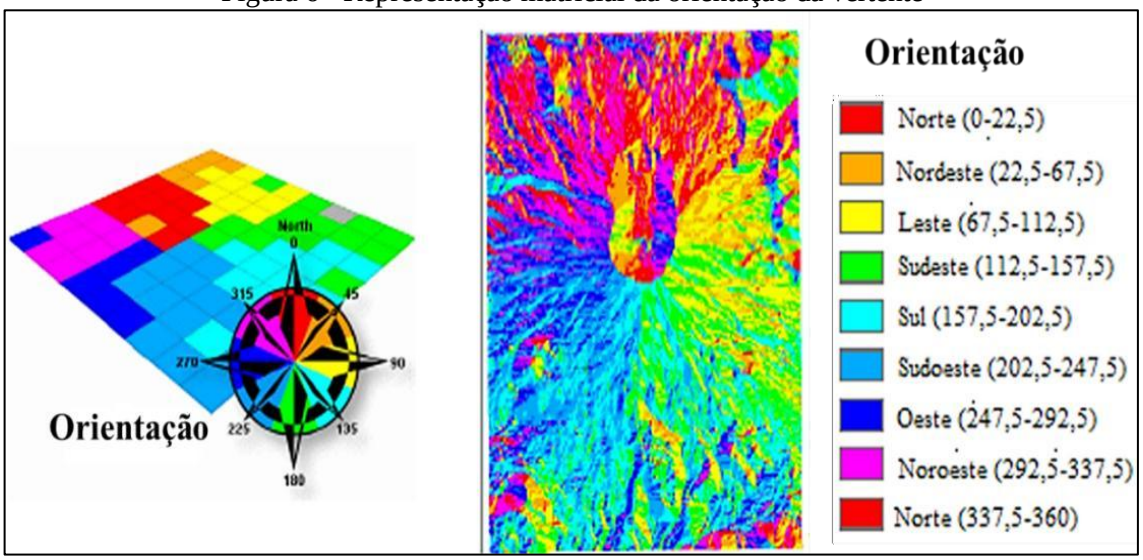
O Quadro 4 destaca as características básicas e as diferenças entre as formas de relevo, destacando também como elas contribuem para a diversidade da paisagem terrestre.

3.4.2.2 Orientação das vertentes

A vertente é uma área inclinada do relevo em relação ao plano horizontal, com grau de inclinação e orientação espacial, definida pela direção do escoamento superficial (Figura 6).

O estudo das vertentes é fundamental para a compreensão de processos morfométricos, dinâmicas erosivas e MGM, pois permite analisar qual lado da vertente recebe maior quantidade de chuva (VELOSO, 2009). No entanto, a saturação está relacionada a outros fatores, por exemplo, a eficiência de infiltração do solo/rocha, variação climática, porosidade, cobertura do solo e da variação do tempo (POURGHASEMI; PRADHAN; GOKCEOGLU, 2012).

Figura 6 - Representação matricial da orientação da vertente



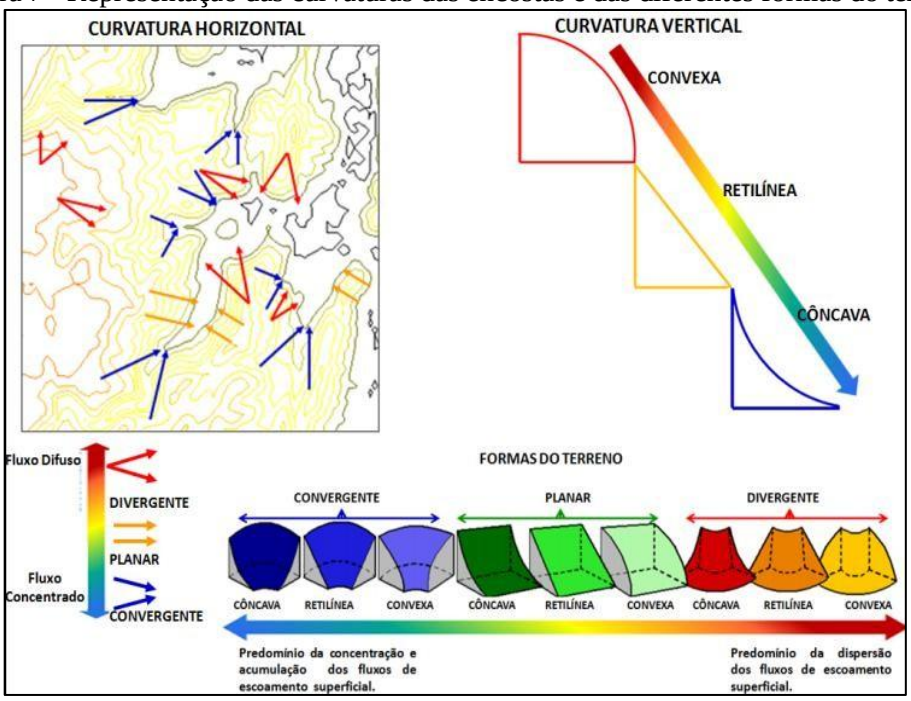
Fonte: Adaptado de IFB (2025)

A Figura 6 apresenta a orientação das vertentes, essa orientação é expressa em azimute, tendo como referência o norte geográfico, com variação angular de 0° a 360° no sentido horário (FLORENZANO, 2008).

3.4.2.3 Curvatura

Nery (2011) destaca que a curvatura é um parâmetro topográfico importante no controle do escoamento superficial em áreas de encosta, classificadas em curvatura vertical (em perfil) e curvatura horizontal (em planta), ilustradas na Figura 7.

Figura 7 - Representação das curvaturas das encostas e das diferentes formas do terreno



Fonte: Valeriano (2008)

Na Figura 7, a curvatura vertical indica se a vertente possui perfil concavo, retilíneo ou convexo. Já a curvatura horizontal, indica se a superfície é convergente, plana ou divergente. Logo, essas características influenciam diretamente na concentração ou a dispersão dos materiais, sob ação da gravidade na superfície de uma encosta lembrando que a água pode apenas acelerar o processo (VALERIANO, 2008).

3.4.3 Condicionantes antrópicos

3.4.3.1 Uso e ocupação

O uso e a ocupação do solo podem ser definidos como a forma pela qual as atividades humanas se distribuem no território, expressando como a dinâmica social se concretiza e se

organiza no espaço urbano (TOMINAGA, 2007). No Brasil, o uso inadequado do espaço urbano tem gerado diversos problemas, especialmente relacionados aos recursos naturais. A rápida urbanização, que deslocou o país de majoritariamente rural em 1940 para 85% urbano em 2005, ocorreu sem planejamento adequado. Esse processo foi impulsionado por fatores como a falta de políticas para permanência no campo, a concentração fundiária, a mecanização agrícola, a industrialização e a percepção de melhores condições de vida nas cidades (Peres, 2011).

A remoção da vegetação em encostas íngremes, mesmo em áreas urbanas, deixa o solo exposto, facilitando seu deslocamento pelas chuvas para as partes baixas da bacia e para o curso d'água. Isso aumenta a entrada de sedimentos, alterando parâmetros como turbidez, cor, sólidos e concentrações de nitrogênio e fósforo. A retirada da vegetação ripária agrava o processo ao desestabilizar taludes, compactar o solo, aumentar a temperatura da água e facilitar a chegada de resíduos sólidos devido à perda da mata ciliar (SILVA, 2011).

A expansão das zonas urbanas altera os padrões naturais de drenagem do solo, reduz a cobertura vegetal e compromete a estabilidade das encostas ((Figura 8). Terrenos inicialmente estáveis podem se tornar suscetíveis devido a intervenções como irrigação, escavações, modificações na drenagem e ocupações inadequadas em áreas inclinadas (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Figura 8 - Avenida Empresário Jorge Montenegro de Barros, 86, Santa Amelia



Fonte: Autora (2025)

As intervenções antrópicas no ambiente, como mostrado na Figura 8, podem gerar ou intensificar deslizamentos em áreas propensas a desastres, ao modificar a dinâmica natural e o relevo. Construções em áreas ambientais e aterros aumentam o perigo de instabilidade do solo. Esses fatores aliados a ação das chuvas, aumentam a vulnerabilidade das encostas (TOMINAGA, 2007).

3.4.4 Precipitação pluviométrica

A precipitação pluviométrica, medida em milímetros, representa a quantidade de chuva em uma área durante um determinado período e é um dos principais fatores climáticos responsáveis por inundações e deslizamentos. Também influencia diretamente a erosão do solo, ao facilitar a desagregação e o transporte de suas partículas. O volume de solo deslocado, por sua vez, depende de variáveis morfométricas como a declividade do terreno, o tipo de solo e a intensidade das chuvas (TOMINAGA, 2007).

3.5 Histórico de eventos na Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, Maceió

Entre 1970 e 2021, foram registrados aproximadamente 11.778 desastres associados a causas climáticas, meteorológicas, hidrológicas e geológicas no Brasil. No território brasileiro, estima-se que existam mais de 3 milhões de moradias precárias, e cerca de 12 milhões de pessoas expostas a eventos extremos (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2023; ONU, 2023).

Na BHRS, em Maceió, observa-se que os MGM ocorrem em áreas impactadas por intervenções antrópicas. No período de chuva em 2017, um escorregamento com grandes volumes de material (Figura 9) resultou em uma vítima fatal e o soterramento de casas (GAMA; MELO FALCÃO, 2023; LEÃO; FARIAS; AMARAL, 2021).

Figura 9 - Ocorrência de deslizamento na BHRS



Fonte: Jornal Extra (2017)

O deslizamento (Figura 9) resultou no desaparecimento de uma pessoa e na necessidade de realocar algumas famílias por meio do programa de aluguel social. Em Maceió, esse auxílio é destinado a famílias em situação de vulnerabilidade, especialmente aquelas afetadas por emergências ou calamidades públicas. O benefício é concedido de acordo com os critérios definidos pela legislação municipal, conforme a Lei nº 7.222/2022 (MACEIÓ, 2022).

3.6 Análises de risco

No estudo de MGM, alguns conceitos são frequentemente utilizados, como evento, suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade e risco. A padronização desses termos contribui para uma melhor compreensão dos resultados, além de garantir que etapas fundamentais de análise sejam aplicadas para diferenciar risco e perigo (HENRIQUE, 2014). O Ministério das Cidades utilizou os termos apresentados no Quadro 5, para fundamentar sua metodologia de mapeamento de encostas e margens fluviais (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Quadro 5 - Conceitos para a análise de área de risco

Termo	Conceito
Evento	Fenômeno com determinadas características, dimensões e localização geográfica registrada ao longo do tempo, sem provocar danos econômicos ou sociais.
Perigo	Condição ou fenômeno com capacidade de gerar consequências adversas.
Vulnerabilidade	Grau de perda de um determinado elemento, grupo ou comunidade em uma área suscetível a ser afetada por um fenômeno ou processo.
Suscetibilidade	Refere-se à probabilidade de ocorrência de processos naturais ou induzidos em uma determinada área, expressa por classes de ocorrência.
Risco	É a relação entre a probabilidade de um fenômeno ocorrer e a magnitude dos danos sociais e/ou econômicos que ele pode causar. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco.
Dano Potencial	Estimativa das consequências de um desastre, sendo fundamental para priorizar investimentos em segurança e planos de emergência.

Fonte: Adaptado de IPT (2007)

Nessa perspectiva do Quadro 5, Tominaga *et al*., (2015) destacam que o impacto de um desastre é determinado não apenas pelas características, probabilidade e intensidade do perigo, mas também pelo grau de vulnerabilidade física, social, econômica e ambiental dos elementos expostos. Com base em Varnes (1978), Tominaga *et al*., (2015) e Tominaga (2007) adotaram a

equação 1 para obter a relação entre a chance de um fenômeno ocorrer e a gravidade de seus impactos sociais ou econômicos.

$$R=P \times V \times DP \quad (1)$$

Onde: R= risco; P= perigo; V= vulnerabilidade; e, DP= dano potencial.

3.7 Mudanças climáticas x eventos extremos no Brasil (últimos 5 anos)

Mudanças climáticas são modificações longas no clima da Terra, provocadas principalmente por atividades humanas que impactam a temperatura, a chuva, o nível do mar e a frequência de eventos extremos. Esses eventos são fenômenos climáticos ou meteorológicos intensos e raros, como tempestades fortes, enchentes, secas prolongadas e ondas de calor, que podem causar danos significativos ao meio ambiente, à sociedade e à economia (QUEIROZ; MARCHEZINI; RODRIGUEZ, 2023; ZEZZO; COLTRI, 2022).

As variações climáticas e a ocorrência de eventos extremos têm afetado significativamente o Brasil nos últimos anos. Atividades humanas como desmatamento e construções em áreas de risco (Figura 10) potencializam os impactos das chuvas fortes, podendo potencializar o MGM com sérios danos às populações causando grandes prejuízos econômicos e perdas de vidas (CASTRO, 2011).

Figura 10 – Desmatamento e Construções em área de risco



Fonte: Autora (2025)

A Figura 10 evidencia o avanço urbano desordenado na Travessa Senhor do Bonfim, no bairro Chã da Jaqueira, caracterizado pela remoção da cobertura vegetal para a construção de residências e vias.

3.8 Suscetibilidade a MGM

A identificação de áreas suscetíveis a MGM é fundamental para gestões municipais e institutos de pesquisa. Entre os métodos mais utilizados está o mapeamento de suscetibilidade**,** que avalia a distribuição espacial da probabilidade de ocorrência desses eventos (ZHANG *et al.*, 2022).

No Brasil, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei Federal 12.608/2012) inclui esse mapeamento como ferramenta essencial para a prevenção de desastres, visando identificar ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades. A suscetibilidade está associada à inclinação do terreno a determinados processos e seus fatores predisponentes. Assim, é necessário identificar as condições predisponentes, intervenções antrópicas e formas indicativas de cada processo geológico (IPT, 2018).

A precisão do mapeamento de suscetibilidade a MGM é influenciada por diversos fatores, que envolvem tanto a entrada de dados como a seleção de indicadores condicionantes e a qualidade do inventário de ocorrências, quanto a metodologia de modelagem**,** incluindo a escolha de algoritmos e parâmetros (TOMAZZOLI, 2016). Mesmo em áreas modificadas por urbanização ou outras intervenções, os fatores predisponentes podem permanecer e devem ser considerados no planejamento e gestão territorial (IPT, 2018).

3.9 Avaliação de suscetibilidade

Considerando as diferentes abordagens para análise e mapeamento de risco e suscetibilidade a MGM, neste capítulo são destacadas apenas algumas propostas que se consolidaram como referências na área. Os métodos podem ser agrupados em três categorias principais: os qualitativos, quantitativos e semiquantitativos. A definição das classes de suscetibilidade de um local depende, em grande parte, dos dados utilizados em cada método (BAHRAMI; HASSANI; MAGHSOUDI, 2021).

Os métodos qualitativos baseiam-se no conhecimento de especialistas e em dados de observações de campo e fotos aéreas. Apesar da interpretação pessoal, são amplamente utilizados, principalmente em áreas com pouca disponibilidade de informações (TOMINAGA, 2007).

Os métodos quantitativos utilizam dados estatísticos para gerar estimativas numéricas, como a probabilidade de ocorrência de MGM e a distribuição probabilística de suas consequências em uma área específica (BEZERRA, 2019). No entanto, esses métodos exigem grande quantidade de dados sobre as encostas, obtidos por meio de ensaios laboratoriais e medições de campo, esses dados tornam sua aplicação restrita a áreas específicas, em função dos altos custos envolvidos (FARIA, 2011). Ademais, não são aplicáveis em locais onde não existam dados confiáveis sobre a frequência dos movimentos de massa.

Por fim, os métodos semiquantitativos integram características das análises qualitativas e quantitativas, atribuindo pontuações a diversos fatores que influenciam a estabilidade, avaliando seu grau de contribuição para a instabilização (COROMINAS *et al.*, 2013). Segundo Zhang *et al*., (2022), essa abordagem tem ganhado evidência por apresentar maior confiabilidade em comparação ao método quantitativo convencional, ao integrar resultados qualitativos na avaliação.

O AHP é um dos principais exemplos de abordagem semiquantitativa no mapeamento de suscetibilidade a MGM, por transformar julgamentos subjetivos em valores numéricos comparáveis de forma racional (ABAY; BARBIERI; WOLDEAREGAY, 2019). Sua aplicação torna os estudos mais sistemáticos e menos subjetivos, contribuindo para a análise de indicadores e a priorização de áreas críticas. Além disso, a análise de sensibilidade do AHP aumenta a confiança nos julgamentos qualitativos e na tomada de decisão (BEZERRA, 2019).

3.10 *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

O AHP possibilita que decisões sejam tomadas com base em critérios matemáticos objetivos, mesmo quando geradas de preferências pessoais e subjetivas (SAATY, 2001). Esse método tem como objetivo atribuir pesos relativos, indicando o grau de importância de uma alternativa em relação a outra por meio de comparações par a par, com o objetivo de apoiar o processo decisório (BRUNELLI, 2015).

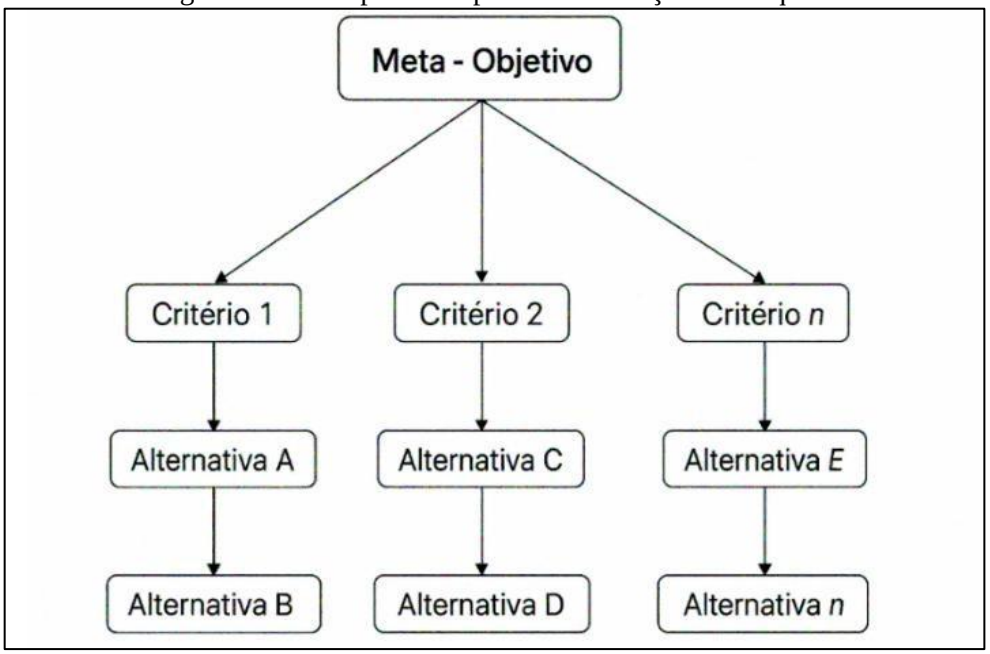
Para Yalcin (2008) o AHP é o método amplamente empregado na escolha de locais, avaliação de adequação, planejamento territorial e na análise da suscetibilidade a deslizamentos de terra. De modo geral, a resolução de problemas por meio do AHP é guiada por três etapas principais: Estruturação da hierarquia, matriz de comparação par a par e o cálculo dos pesos.

3.10.1 Estruturação da hierarquia

O problema é decomposto em uma estrutura hierárquica em forma de “árvore invertida”, que parte do objetivo geral e se divide em critérios, subcritérios e alternativas. Essa organização permite comparar a importância dos critérios e relacionar as alternativas, cabendo ao analista

ajustar a hierarquia, posicionando critérios menos relevantes nos níveis superiores e os decisivos em níveis mais específicos, como mostra a Figura 11 (BHUSHAN; RAI, 2004; SAATY; VARGAS, 2012).

Figura 11 - Exemplo da etapa de Estruturação Hierárquica



Fonte: Bezerra (2019)

A Figura 11 mostra a estruturação dos critérios de avaliação e as alternativas relevantes ao processo decisório, que podem incluir atores, cenários, fatores climáticos e outros elementos oriundos da experiência e da intuição (BEZERRA, 2019).

3.10.2 Matriz de comparação par a par

As alternativas são comparadas par a par usando uma escala qualitativa, convertida em valores quantitativos para medir sua importância dentro de cada critério (BHUSHAN; RAI, 2004). Essas comparações formam uma matriz onde a diagonal soma 1, valores maiores que 1 indicam predominância da alternativa da linha sobre a da coluna. Com isso, obtêm-se os pesos relativos das alternativas. É necessário calcular o índice de consistência da matriz para verificar se as comparações precisam ser refeitas.

A escala sugerida pelo autor no método varia de 1 a 9, em que 1 indica igualdade de importância entre dois critérios, enquanto 9 representa a importância máxima de um critério em relação ao outro (SAATY, 2013). A Tabela 1 apresenta a escala usada para essas comparações.

Tabela 1 - Escala com valores de intensidade utilizada na análise

Intensidade/ Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	As duas alternativas contribuem igualmente ao objetivo
2	Importância fraca	
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma sobre a outra
4	Importância moderada (+)	
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma sobre a outra
6	Importância forte (+)	
7	Importância muito forte ou demonstrada	Uma é favorecida muito fortemente sobre a outra; a dominância é demonstrada na prática
8	Importância muito, muito forte	
9	Importância extrema	A evidência que favorece uma sobre a outra é da mais alta ordem possível de afirmação

Fonte: Saaty e Vargas (2012)

Conforme ilustrado na Tabela 1, a escala é utilizada para realizar comparações par a par, determinando qual fator é mais importante dentro da escala de 1 a 9. As comparações pareadas são fundamentais no uso do AHP, sendo que, os julgamentos, representados pelos números da escala, são aplicados nessas comparações.

3.10.3 Autovetor

O autovetor corresponde aos pesos que expressam a importância relativa de cada critério, convertendo os julgamentos atribuídos na matriz em valores numéricos consistentes e proporcionais. Nessa etapa, são calculados os pesos de todos os níveis da matriz AHP, o que evidencia as prioridades na resolução do problema. Dessa forma, as comparações realizadas pelos avaliadores permitem transformar percepções subjetivas em valores mensuráveis (TAQUEZ, 2017).

O objetivo é obter um conjunto de pesos relativos, representados pelo autovetor normalizado da matriz, calculado por meio da técnica do autovalor. Segundo Abay, Barbieri e Woldearegay (2019), esse processo envolve somar as colunas da matriz, normalizar seus elementos dividindo-os pelos respectivos totais e, em seguida, calcular a média das linhas normalizadas, resultando nos pesos finais dos critérios.

3.10.4 Análise de consistência

A consistência lógica dos julgamentos atribuídos na matriz de comparação par a par é verificada por meio da análise de consistência, baseada no cálculo do autovalor máximo da

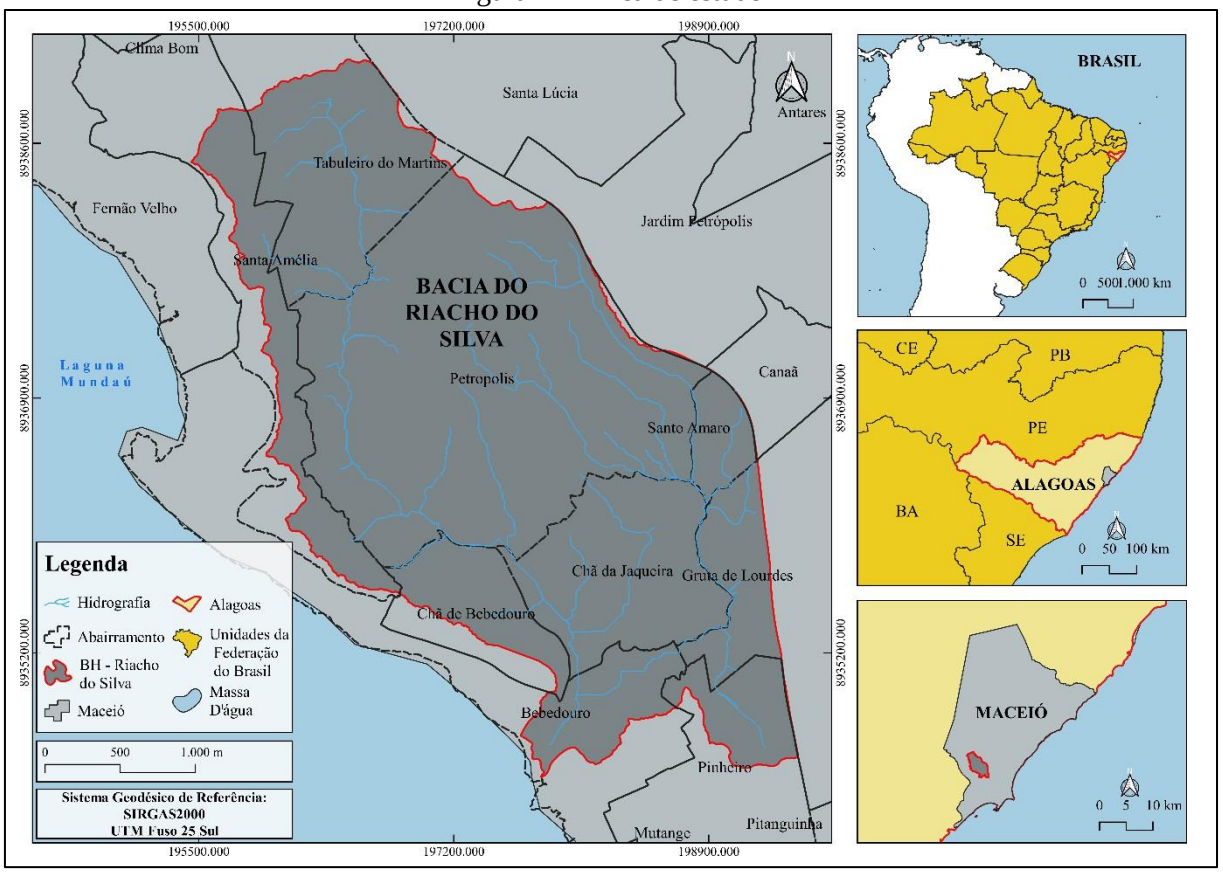
matriz. Conforme Saaty (1990), uma matriz é perfeitamente consistente quando seu autovalor máximo é exatamente igual ao número de elementos comparados. O desvio dessa condição ideal é medido pelo Índice de Consistência (IC), sendo que valores menores indicam maior consistência. Para avaliar se essa inconsistência é admissível, o IC é comparado ao Índice de Consistência Aleatória (RI), o que permite calcular a Razão de Consistência (RC). Os julgamentos são considerados aceitáveis quando RC é inferior a 0,10 (10%).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo da BHRS (Figura 12), localiza-se na zona oeste do município de Maceió, abrangendo aproximadamente 10 km². Seu curso d'água principal possui cerca de 6,25 km de extensão, em um relevo que apresenta declividade média de 8,5°, podendo alcançar valores máximos de 84,2°. A altitude varia entre 1 e 95 metros, com média de 51,2 metros. Geograficamente a unidade está inserida entre as coordenadas 9°34'54,2" e 9°37'43,8" de latitude sul, e 35°44'17,5" e 35°46'30,8" de longitude oeste (FREITAS, 2022; GAMA; FALCÃO, 2023).

Figura 12 - Área de estudo



Fonte: Autora (2025)

A bacia hidrográfica (Figura 12), está localizada integralmente nos bairros Petrópolis, Santo Amaro e Chã da Jaqueira, estendendo-se parcialmente por Tabuleiro do Martins, Santa Amélia, Gruta de Lourdes, Pinheiro, Bebedouro, Chã de Bebedouro, Santa Lúcia, Jardim Petrópolis e Canaã.

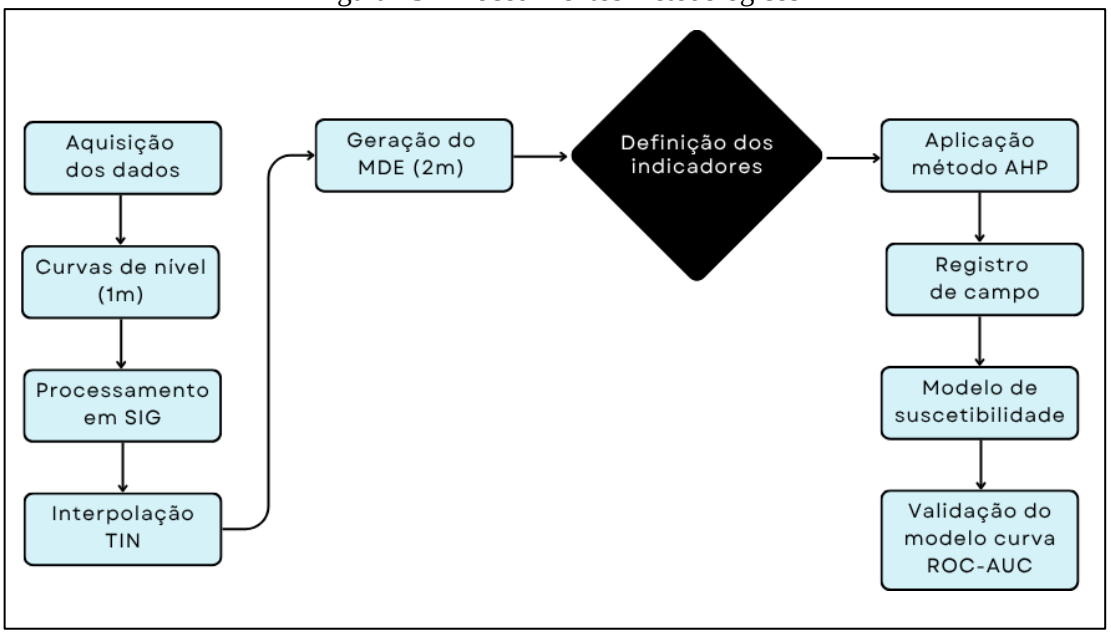
Em termos Morfométricos, a BHRS apresenta formato alongado, coeficiente de compacidade de 1,29, fator de forma de 0,22 e densidade de drenagem de cerca de 3,0 km/km². É formada pelo Riacho do Silva, seu curso principal (GAMA; FALCÃO, 2023; SILVA, 2011).

A bacia integra a região hidrográfica do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú–Manguaba (CELMM), estando totalmente inserida no perímetro urbano de Maceió. Apesar de sua riqueza em recursos hídricos e biodiversidade, sofre intensa pressão antrópica, sobretudo pela ocupação irregular em Áreas de Preservação Permanente (APP), agravada pela ausência de saneamento básico, fiscalização ambiental e baixa conscientização da população, fatores que intensificam a degradação socioambiental (SILVA, 2011).

4.2 Metodologia

Os estudos desenvolvidos nesta pesquisa adotaram como abordagem central o método multicritério semiquantitativo AHP, proposto por Saaty (1977), associado a técnicas de geoprocessamento e SIG para o mapeamento da suscetibilidade a MGM na BHRS, considerando sete indicadores definidos a partir de revisão bibliográfica, disponibilidade de dados e validação em campo. A metodologia adotada foi estruturada em etapas sequenciais, conforme detalhado no fluxograma da pesquisa Figura 13.

Figura 13 - Procedimentos metodológicos



Fonte: Autora (2025)

Este trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, pois tem como objetivo coletar e analisar informações de uma bacia hidrográfica específica (BRESSAN, 2000). De início, foi realizada a seleção e caracterização da área de estudo, integrando informações bibliográficas, cartográficas e registros de campo. As etapas da metodologia (Figura 13) estão detalhadas abaixo.

4.2.1 Aquisição dos dados

Com base nos dados da base cartográfica municipal de Maceió, foram utilizadas as curvas de nível com resolução espacial de 1m.

4.2.2 Processamento dos dados em ambiente SIG

As curvas de nível georreferenciadas foram interpoladas pelo método *Triangulated Irregular Network* (TIN), dos quais as faces dos triângulos sobrepostos formam uma superfície contínua representando o relevo, e a interpolação dos valores altimétricos considera os triângulos do método (BARBOSA; DE MELLO; DA SILVA, 2009). Assim, permitindo a geração de um MDE *raster* com resolução espacial de 2 metros.

4.2.3 Definição dos indicadores e geração dos mapas temáticos

De acordo com Yalcin (2008), não há um padrão para a seleção dos indicadores no mapeamento de suscetibilidade a MGM, eles são definidos conforme a disponibilidade e a qualidade dos dados, assegurando a confiabilidade dos resultados. Assim, com base em dados consistentes da BHRS e em referências da literatura (GAMA; FALCÃO, 2023) foram definidos sete indicadores e elaborados oito mapas temáticos em formato *raster*, com pixels de 2 m, normalizados para permitir comparações numéricas na análise multicritério.

4.2.4 Mapa de Atitude (hipsometria)

Os valores do MDE, em conjunto com as curvas de nível foram a base para a elaboração dos demais critérios da análise do terreno, definidas a partir da variação do relevo, e classificados no SIG.

4.2.5 Mapa de Declividade

A declividade foi obtida pelo método de Horn (1981), com base nos dados do MDE. O cálculo seguiu os três passos abaixo:

I. Cálculo dos Gradientes Parciais, usando uma vizinhança 3x3.

Iniciou-se com o cálculo dos gradientes parciais de primeira ordem da superfície, que representam as taxas de variação da elevação nas direções dos eixos cartesianos x e y.

$$\begin{matrix} z1 & z2 & z3 \\ [z4 & z5 & z6] \\ z7 & z8 & z9 \end{matrix}$$

Sendo z_5 a célula alvo para a qual os parâmetros estão sendo calculados. Os gradientes parciais são obtidos pelas seguintes equações 2 e 3:

Gradiente na direção x (Leste-Oeste):

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(z_3+2z_6+z_9)-(z_1+2z_4+z_7)}{8.\Delta x} \quad (2)$$

Gradiente na direção y (Norte-Sul):

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(z_7+2z_8+z_9)-(z_1+2z_2+z_3)}{8.\Delta y} \quad (3)$$

Onde Δx e Δy: Representam a resolução espacial do MDE nas direções x e y, respectivamente.

Pesos (2 e 1): o diferencial do método é a atribuição de pesos diferenciais. Células diretamente alinhadas aos eixos (z_4, z_6 para x; z_2, z_8 para y) recebem peso 2, conferindo-lhes maior influência. Células diagonais (z_1, z_3, z_7, z_9) recebem peso 1;

Denominador 8: Constante de normalização resultante da soma total dos pesos aplicados no numerador: (1 + 2 + 1) + (1 + 2 + 1) = 8 (ARAÚJO, 2023; SILVA, 2021).

II. Cálculo da Magnitude do Gradiente (*Rise over Run*)

Esta etapa calculou a máxima taxa de variação da elevação, ignorando a direção, equação 4.

$$\text{Taxa de declividade} = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

Este valor, conhecido como "*rise over run*", representa quantos metros sobe (rise) ou desce (*run*), para cada metro percorrido horizontalmente. É adimensional (m/m).

III. Conversão para Declividade (β)

A declividade final (β) é o ângulo de inclinação, obtido aplicando a função arco-tangente à taxa calculada acima, de acordo com a equação 5.

Declividade em Percentual (%):

$$\text{declividade} = \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}\right) \text{ x } 100\% \quad (5)$$

Para classificar o relevo utilizou-se a Tabela 2, que relaciona características topográficas, declividade e elevação.

Tabela 2 - Classes do relevo

Classes de relevo	Características
Plano	declividades variáveis de 0% a 3%.
Suave Ondulado	declives suaves de 3% a 8%.
Ondulado	declives moderados de 8% a 20%.
Forte ondulado	declives fortes de 20% a 45%.
Montanhoso	declives fortes e muito fortes de 45% a 75%.
Escarpado	declives muito fortes > a 75%

Fonte: Adaptado EMBRAPA (2018)

Na Tabela 2, as classes, vão de áreas planas a escarpadas, apresentando critérios para caracterizar a intensidade do relevo, auxiliando no planejamento urbano, em estudos ambientais e na conservação do solo.

4.2.6 Orientação das vertentes

Conforme estabelecido por Horn (1981), o cálculo deriva diretamente dos gradientes parciais $(\frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial z}{\partial x})$ obtidos para o cálculo da declividade, de acordo com a equação 6. A orientação (α) representa a direção do vetor gradiente (∇z), que aponta para a subida mais íngreme do terreno.

$$\alpha = \arctan_2\left(-\frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial z}{\partial x}\right) \quad (6)$$

O sinal negativo em $-\frac{\partial z}{\partial y}$ ajusta a convenção angular para o norte = 0°.

4.2.7 Mapa de Curvatura horizontal

O cálculo da curvatura horizontal por Horn (1981), utiliza as derivadas parciais de primeira e segunda ordem. A equação 7 abaixo.

$$kh = -\frac{\left(\frac{k^2z}{kx^2}\right)\left(\frac{kz}{ky}\right)^2 - 2\left(\frac{k^2z}{kxky}\right)\left(\frac{kz}{kx}\right)\left(\frac{kz}{ky}\right) + \left(\frac{k^2z}{ky^2}\right)\left(\frac{kz}{kx}\right)^2}{\left(\left(\frac{kz}{kx}\right)^2 + \left(\frac{kz}{ky}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (7)$$

Onde, kh é a curvatura horizontal.

Valores positivos de curvatura horizontal indicam divergência do fluxo, os valores negativos indicam convergência. O valor zero representa uma superfície plana (SILVA, 2021).

4.2.8 Mapa de Curvatura vertical

Curvatura vertical obtida pelo método de Horn (1981), estende a lógica do cálculo do gradiente, incorporando agora as derivadas parciais de segunda ordem do terreno. A equação 8, que deriva da análise diferencial geométrica de superfícies, é dada por:

$$kv = -\frac{\left(\frac{k^2z}{kx^2}\right)\left(\frac{kz}{kx}\right)^2 + 2\left(\frac{k^2z}{kxky}\right)\left(\frac{kz}{kx}\right)\left(\frac{kz}{ky}\right) + \left(\frac{k^2z}{ky^2}\right)\left(\frac{kz}{kx}\right)^2}{\left(\left(\frac{kz}{kx}\right)^2 + \left(\frac{kz}{ky}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (8)$$

Onde, *kv* é a curvatura vertical

Adota-se um sinal negativo para representar superfícies convexas, um sinal positivo para superfícies côncavas e o valor zero para indicar superfícies planas (SILVA, 2021).

4.2.9 Mapa de uso e ocupação

Para a obtenção do uso e ocupação do solo na BHRS, foi utilizada imagem *raster* do sensor *CBERS 4-A* adquirida em 21 de junho de 2020, com resolução espacial de 8m, o qual após pré-processamento, passou por fusão de imagens, nas quais foram utilizadas a composição colorida e a banda pancromática para ampliar a resolução da imagem para 2m (ROCHA; KÖRTING; NAMIKAWA, 2024). As definições de classes estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Definição das classes de uso e cobertura do solo

Classes	Números de amostras
Área Urbana	15
Vegetação Densa	15
Solo Exposto	15
Corpo Hídrico	20
Vegetação Rala	15

Fonte: Autora (2025)

As classes apresentadas acima (Tabela 3), são frequentemente observadas na área de estudo e o número de amostras coletadas estão de acordo com a percepção visual na fotointerpretação realizada em ambiente SIG *QGIS* 3.16, utilizando o método de classificação *Random Forest*.

4.2.10. Classificação do uso e cobertura da terra utilizando *Random Forest*

Para a geração do mapa de uso e ocupação do solo, foi empregado o algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest.* A escolha deste método deve-se à sua alta capacidade de filtrar e realizar correções em ruídos presentes nas cenas, e vasto potencial, logo que, possui baixa demanda de amostras de treinamento (MAPELLI, 2025).

A partir das cinco classes de interesse, foram coletadas 80 amostras de treinamento mediante fotointerpretação. O algoritmo *Random Forest* foi empregado no processo de classificação, utilizando as amostras e valores espectrais dos pixels, com parâmetros ajustados visando à otimização da acurácia global, a qual é obtida dividindo o total de acertos pelo total de amostras realizadas pelo *Random Forest.*

4.2.11. Mapa de Litologia

Foi elaborado a partir dos dados vetoriais da cartografia geológica obtido de Alcantara *et al*., (2023), que possui escala de 1:100.000 e passou por rasterização e padronização para um pixel de 2m de resolução.

4.2.12. Mapa de distância a rede de drenagem

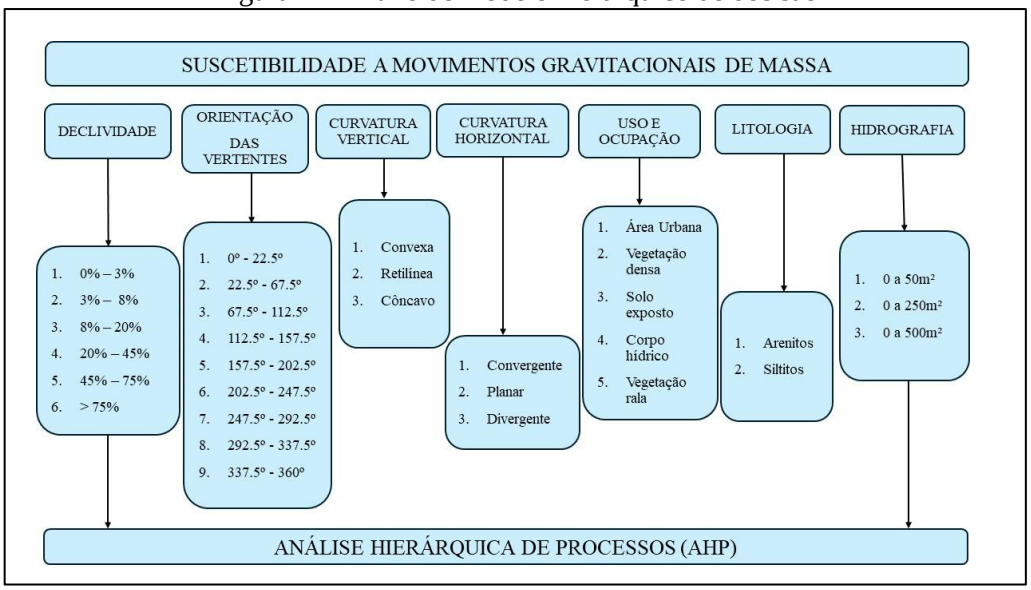
Foi desenvolvido por meio da ferramenta *buffer* do *Qgis*, considerando as áreas mais próximas aos cursos d'água como as mais críticas, com intervalos de 0 a 50m, 0 a 100m e 0 a 200m.

4.3 Aplicação do método AHP

4.3.1 Estruturação da Hierarquia de Decisão

Após a definição dos sete indicadores, a hierarquia do problema foi estruturada em três níveis, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Fluxo de modelo hierárquico de decisão



Fonte: Adaptado de Araújo (2023)

As etapas do fluxograma (Figura 14), são detalhadas abaixo.

1. Objetivo: No nível superior, definir a suscetibilidade a MGM na BHRS.
2. Critérios: No nível intermediário, os sete mapas temáticos (Declividade, Orientação das vertentes, Curvatura Vertical, Curvatura Horizontal, Uso do Solo, Litologia, Distância à Drenagem) foram definidos como critérios de influência.
3. Alternativas: No nível inferior, as alternativas são as próprias células do *raster*, que serão classificadas nas categorias de suscetibilidade.

4.3.2 Matriz de Comparação Par a Par e Obtenção dos Pesos

A matriz de comparação par a par foi construída para avaliar a importância relativa entre cada par de critérios. Os julgamentos foram atribuídos baseados nos levantamentos bibliográficos e associados a observações em campo, utilizando a escala fundamental de Saaty (1987). A partir desta matriz, os pesos de prioridade de cada critério foram calculados por meio do método do autovetor principal (SANTOS *et al.*, 2024).

4.3.3 Teste de Consistência Lógica

Para garantir a confiabilidade dos julgamentos, foi calculada a Razão de Consistência (RC) equação 9, para cada matriz de comparação, como demostrado abaixo (SAATY; VARGAS, 2012).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (9)$$

Em que IR é o índice aleatório que pode ser extraído da Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

N	2	3	4	5	6	7
IR	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

Fonte: adaptado de Piratelli; Belderrain, (2010)

IC= índice de Consistência, mostrado na equação 10.

$$(\text{IC}) = IC = \frac{(\lambda max - n)}{(n-1)} \quad (10)$$

Onde o n é o número de indicadores testados correspondentes ao número colunas ou de linhas e λ_{max} o autovetor, calculado pela equação 11.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{[Aw]i}{Wi} \quad (11)$$

Logo, $[Aw]i$ é a matriz resultante do produto da matriz de comparação pareada pela matriz dos pesos calculados e Wi são os pesos calculados.

Apenas matrizes com RC ≤ 0,10 foram aceitas para o estudo. Matrizes que não atenderam a este parâmetro serão revisadas.

4.4 Registros de campo

A visita de campo, realizada em julho de 2025, teve como principal objetivo validar os dados e confirmar a coerência dos mapas temáticos elaborados. Durante o trabalho *in loco*, foram registrados quatro pontos com recorrência de movimentos de massa em encostas, permitindo o reconhecimento direto do terreno e a verificação da representatividade dos fatores selecionados. As informações coletadas subsidiaram a construção da matriz AHP, contribuindo para o aprimoramento dos critérios de suscetibilidade. Também foram analisadas as condições topográficas, antrópicas e geológicas dos locais, a fim de identificar os fatores mais determinantes para a ocorrência dos MGM. Vale ressaltar que essa análise foi aplicada exclusivamente ao mapa de suscetibilidade da bacia hidrográfica.

4.5 Geração do Mapa de Suscetibilidade e Validação

4.5.1 Álgebra de Mapas e Soma Ponderada

O mapa de suscetibilidade foi gerado por meio de uma álgebra de mapas de soma ponderada, utilizando a Calculadora *Raster* do *QGIS*. Cada mapa temático reclassificado (com valores de 1 a 7 representando o grau de influência na instabilidade) foi multiplicado pelo seu

respectivo peso definido na análise AHP. A soma desses produtos resultou em um mapa contínuo de suscetibilidade.

4.5.2 Classificação e Validação do Modelo

O mapa de suscetibilidade foi classificado em cinco categorias: muito baixa ou nula, baixa, moderada, alta e muito alta. A validação do modelo foi realizada por meio da Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), a partir da sobreposição do mapa de suscetibilidade com registros fotográficos de campo e as ocorrências de deslizamentos cedidas pela COMPEDEC-Maceió. Esses dados deram origem ao *raster* da suscetibilidade real, representado por um arquivo binário com valores que variam de 0 a 1.

A precisão do modelo foi avaliada com base na Área Sob a Curva (AUC), sendo que valores superiores a 0,7 indicam desempenho aceitável, acima de 0,8 desempenho bom e, acima de 0,9, desempenho excelente (BAHRAMI; HASSANI; MAGHSOUDI, 2021).

Para isso, os dados contínuos de suscetibilidade foram comparados aos dados binários, permitindo calcular a sensibilidade (*True Positive Rate – TPR*) e a taxa de falsos positivos (*False Positive Rate – FPR*). A partir desses indicadores, é possível analisar a tendência dos dados e compreender o comportamento do modelo em relação à área sob a curva.

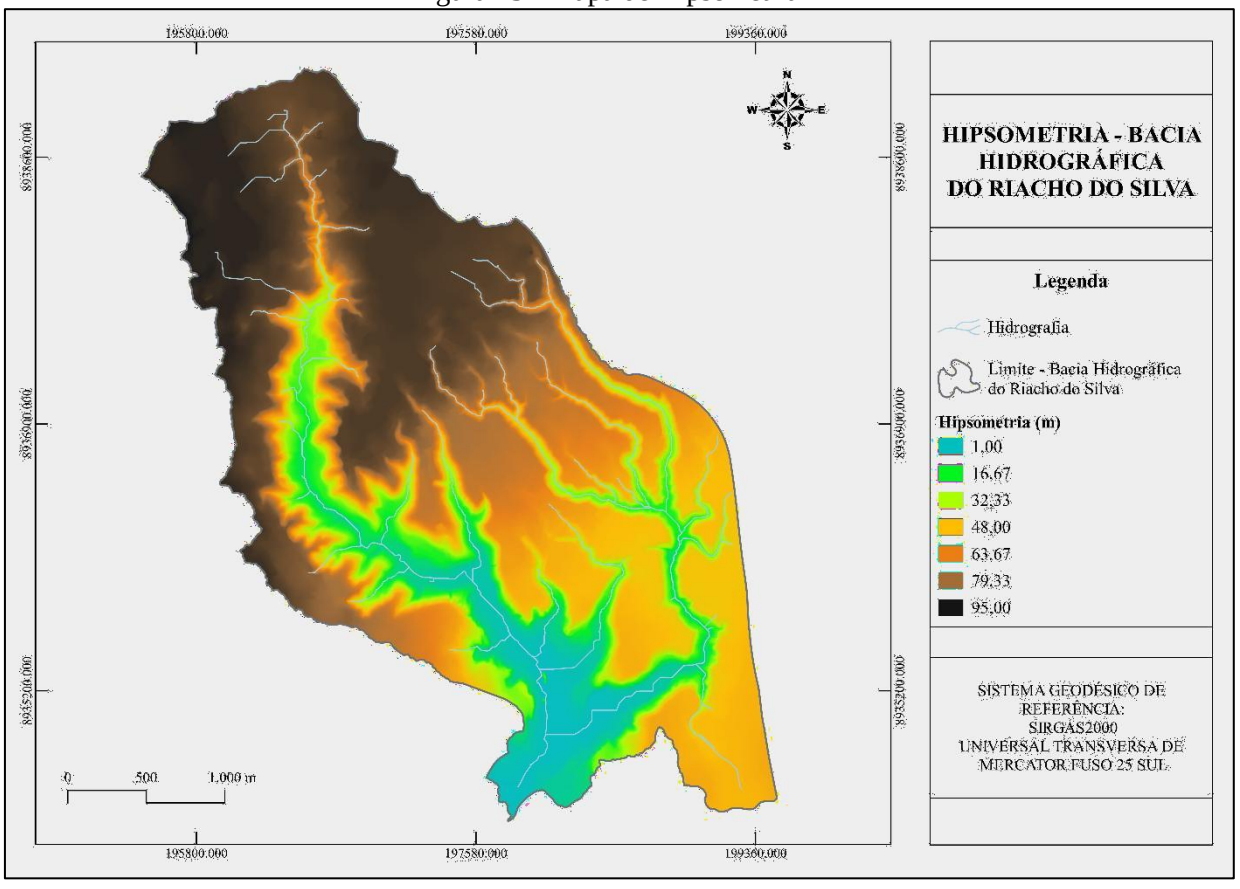
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados das análises realizadas a partir dos mapas temáticos e a aplicação do método AHP, que resultaram no mapa final de suscetibilidade. Foram utilizados sete indicadores considerados essenciais no controle da instabilidade do terreno, com o objetivo de avaliar a influência de cada um na suscetibilidade à ocorrência de MGM na bacia hidrográfica.

5.1 Condicionantes Morfométricos

A Figura 15 ilustra a variação altimétrica da BHRS, representada em intervalos de classes com cores gradativas, com altitudes que variam de 1,0m a 95m.

Figura 15 - Mapa de Hipsometria

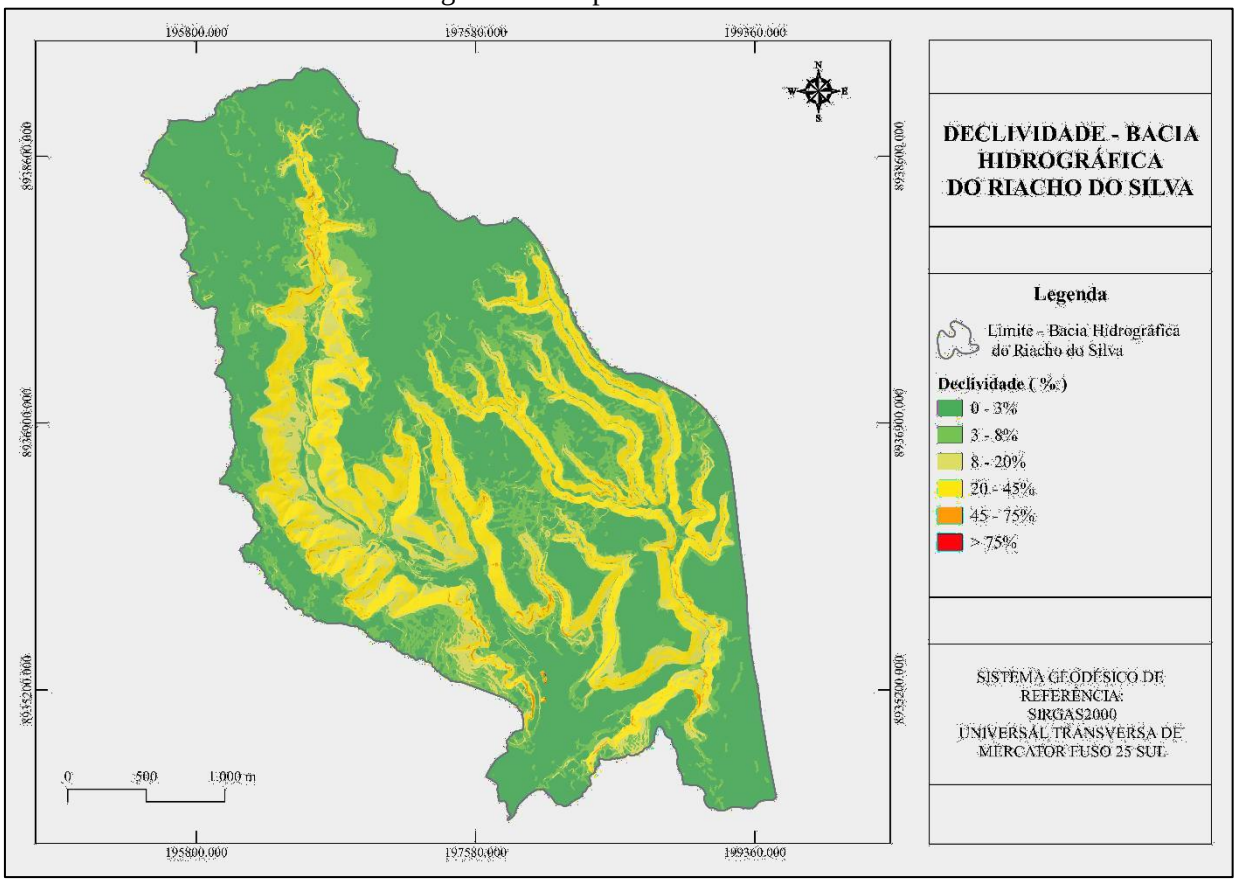


Fonte: Autora (2025)

Na Figura 15, observa-se que a área de maior altitude da bacia hidrográfica localiza-se na região do Tabuleiro dos Martins o que para Gama; Falcão (2023), caracterizando-se como uma região mais propensa a escorregamentos e ao aumento da velocidade do escoamento da água.

Por outro lado, o mapa de declividade (Figura 16) apresenta a classificação e a representação da variação da inclinação do terreno dentro dos limites da bacia hidrográfica, com as diferentes classes identificadas por meio de um gradiente de cores.

Figura 16 - Mapa de declividade



Fonte: Autora (2025)

O mapa acima evidencia que a maior parte do relevo da bacia é classificada como plano, com declividade entre 0% e 3%, enquanto a área forte ondulada apresenta declividade entre 20% e 45%, conforme os critérios da Embrapa (2018). Nesse contexto, a declividade é um dos principais indicadores utilizados em estudos de estabilidade de encostas, conforme demonstrado por Dou *et al.*, (2015). A Tabela 5 apresenta a distribuição espacial da BHRS segundo as classes de declividade.

Tabela 5 - Classes de Declividade

Declividade	Classificação	Área (km²)	% da Área
0 – 3%	Plano	5,47	53,42
3 – 8%	Suave ondulado	1,58	15,43
8 – 20%	Ondulado	1,16	11,33
20 – 45%	Forte ondulado	1,97	19,23
45– 75%	Montanhoso	0,06	0,59
>75%	Escarpado	0,00	0,00
Total		**10,23**	**100,00**

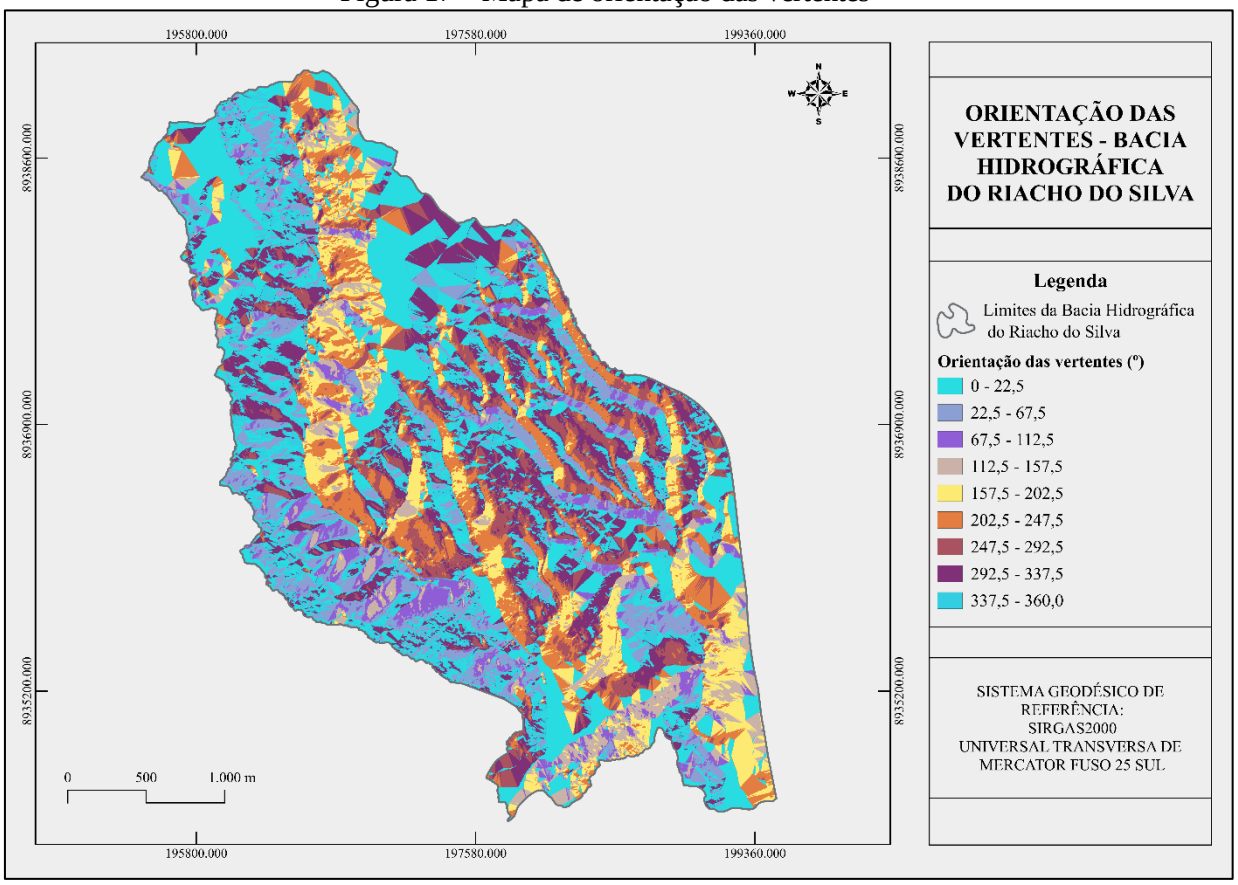
Fonte: Autora (2025)

A partir da Tabela acima, verifica-se a extensão de 5,47 km², correspondente a 53,42% da área da bacia, referente ao relevo plano, caracterizado por baixa inclinação, propício à acumulação de água, onde o escoamento superficial se torna mais lento.

Já o relevo forte ondulado ocupa 1,97 km², equivalente a 19,23% da área total da bacia hidrográfica. Essas áreas, devido à alta inclinação, ao elevado potencial erosivo e a suscetibilidade a MGM, são classificadas como Áreas de Preservação Permanente (APP), segundo o Código Florestal, destinando-se à preservação da vegetação nativa (BRASIL, 2012).

Já a Figura 17 apresenta o mapa de orientação das vertentes, que indica a direção para a qual cada encosta está voltada, permitindo identificar os lados que recebem maior quantidade de chuva, e, consequentemente, influenciam no acúmulo de água no solo. Assim, potencializando a velocidade de saturação, tornando o solo mais suscetível a MGM.

Figura 17 – Mapa de orientação das vertentes



Fonte: Autora (2025)

A predominância das orientações Norte, Noroeste e Nordeste, que correspondem a 58 % da área da bacia (Tabela 6), afeta o regime hídrico local. Essa configuração favorece maior variabilidade no escoamento superficial, podendo resultar em enchentes rápidas após eventos pluviométricos intensos, de acordo com Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu (2012). Nessas

condições, há também maior suscetibilidade a processos erosivos e à degradação do solo, especialmente em áreas onde a cobertura vegetal natural foi removida conforme Veloso (2009).

Tabela 6 - Classes de Orientação das Vertentes

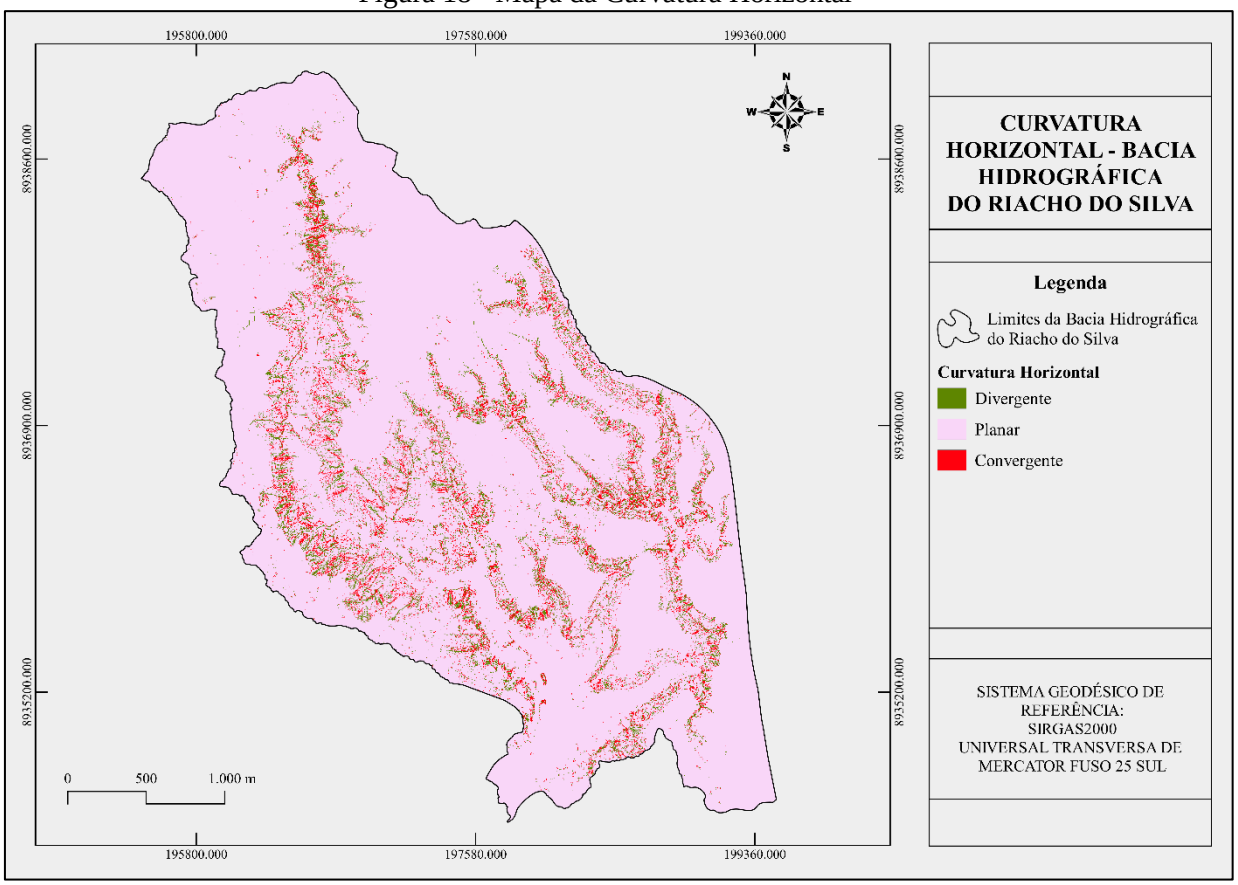
Classes	Orientação das vertentes (º)	Área (km²)	Área (%)
Norte	0 - 22,5 / 337,5 - 360	3,41	33,37
Nordeste	22,5 – 67,5	1,12	10,96
Leste	67,5 – 112,5	0,48	4,70
Sudeste	112,5 – 157,5	0,58	5,68
Sul	157,5 – 202,5	1,02	9,98
Sudoeste	202,5 – 247,5	1,21	11,85
Oeste	247,5 – 292,5	1,00	9,79
Noroeste	292,5 - 337,5	1,40	13,72
Total		**10,23**	**100,00**

Fonte: Autora (2025)

A Tabela indica que outras orientações, variando de 4,70% (leste) a 11,85% (sudoeste), têm menor representatividade espacial na bacia, mas ainda influenciam a dinâmica da drenagem e o escoamento pluvial conforme a exposição das vertentes.

Entre os indicadores analisados, a curvatura horizontal mostra o comportamento da superfície da bacia em relação ao sentido do escoamento superficial, sendo dividida em três categorias: divergente, planar e convergente (Figura 18).

Figura 18 - Mapa da Curvatura Horizontal



Fonte: Autora (2025)

O mapa evidencia que a classe planar predomina na área de estudo, ocupando 91,28% da superfície, conforme mostra a Tabela 7. Isso indica que o relevo é principalmente reto ou é suavemente inclinado no sentido horizontal. Nessas condições, o escoamento da água costuma ocorrer de forma mais uniforme e previsível, descendo a encosta sem grandes concentrações ou dispersões, conforme observado por Valeriano (2008).

Tabela 7 - Classes da Curvatura Horizontal

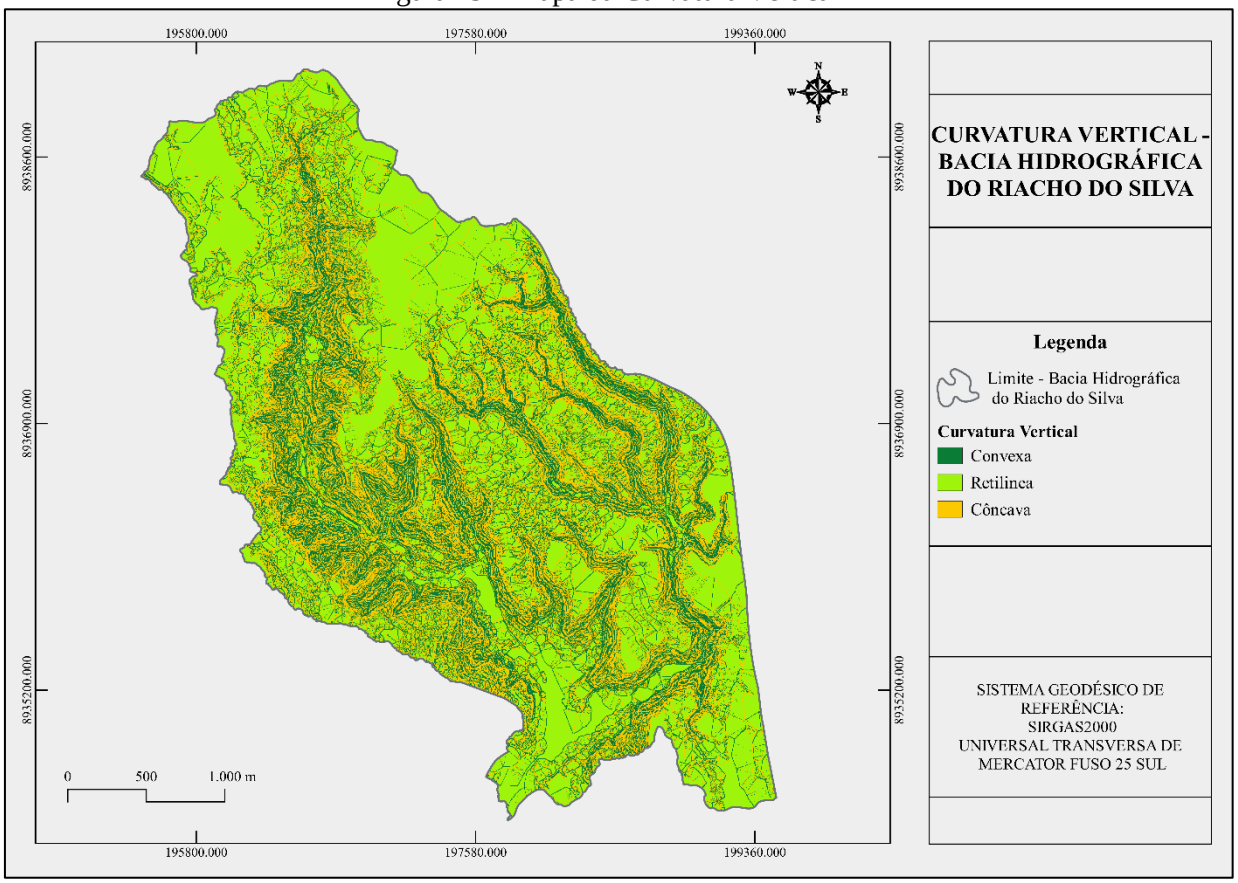
Curvatura Horizontal	Área (km²)	Área (%)
Divergente	0,43	4,20
Planar	9,34	91,28
Convergente	0,44	4,30
Total	**10,23**	**100,00**

Fonte: Autora (2025)

A Tabela acima indica que as classes convergentes 4,30% e divergente 4,20% apresentam parcela mínima e praticamente equivalentes na bacia.

Bem como, a Figura 19 apresenta o mapa de curvatura vertical, que classifica as encostas em côncavas, convexas e retilíneas ao longo de seu perfil, indicando as áreas onde o fluxo de água tende a acelerar ou desacelerar.

Figura 19 – Mapa da Curvatura Vertical



Fonte: Autora (2025)

O mapa demonstra que a maior parte da área analisada é classificada como retilínea, onde o fluxo de água mantém velocidade constante, controlando o transporte de sedimentos.

Por outro lado, às regiões convexas, nas quais o fluxo hídrico é acelerado, intensifica os processos destrutivos do solo. De acordo com a Tabela 8, 4,34 km² da área apresentam curvatura retilínea, condição que favorece a estabilidade no transporte de sedimentos devido a velocidade constante do fluxo.

Tabela 8 – Classes da Curvatura Vertical

Curvatura Vertical	Área (km²)	Área (%)
Convexa	2,80	27,37
Retilínea	4,34	42,42
Côncava	3,08	30,12
Total	**10,23**	**100,00**

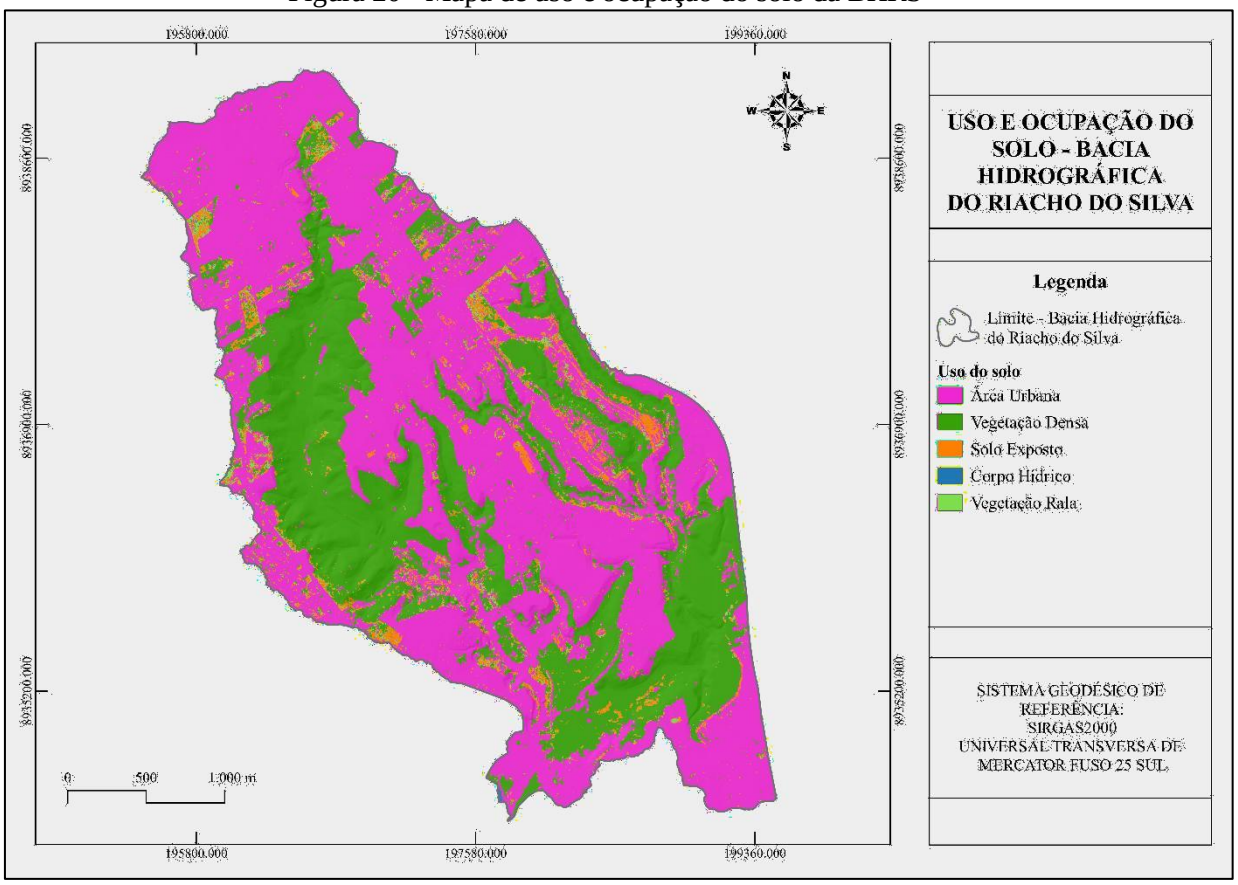
Fonte: Autora (2025)

A tabela apresenta as áreas de curvatura convexa (2,80 km²) que aceleram o escoamento e intensificam a erosão, enquanto as zonas de curvatura côncava (3,08 km²) desaceleram o fluxo, favorecendo a deposição de sedimentos, como ressalta Valeriano (2008).

5.2 Condicionantes Antrópicos

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 20) representa por meio da classificação a distribuição e utilização da área através do processo de ocupação ao longo da BHRS.

Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo da BHRS



Fonte: Autora (2025)

A Figura acima destaca a predominância da classe da área urbanizada, evidenciando uma paisagem intensamente modificada pela ação antrópica, caracterizada pela urbanização e pela presença de vegetação densa. Conforme fundamentado por Tominaga (2007), a remoção da vegetação compromete a estabilidade do solo, aumentando a probabilidade de deslizamento. A seguir, a Tabela 9 apresenta a matriz de confusão resultante da classificação supervisionada realizada com o método *Random Forest*.

Tabela 9 - Matriz de confusão

Ref/Pred	Área Urbana	Vegetação Densa	Solo Exposto	Corpo Hídrico	Vegetação Rala
Área Urbana	57542	80	1241	5	360
Vegetação Densa	164	27232	248	1	267
Solo Exposto	220	50	1085	1	141
Corpo Hídrico	0	0	0	1	0
Vegetação Rala	61	16	91	0	309

Fonte: Autora (2025)

Com base na Tabela 9, observa-se maior confusão entre as classes solo exposto, corpo hídrico e vegetação rala. No entanto, as classes área urbana e vegetação densa apresentaram desempenho de classificação excelente. De modo geral, o modelo alcançou uma acurácia global de 96,70%, indicando alta precisão na classificação.

De acordo com a Tabela 10, a área urbana ocupa 5,92 km² da região, condição que intensifica a suscetibilidade a MGM devido à influência do uso e cobertura do solo.

Tabela 10 - Classes de Uso e ocupação do solo

Classes	Área (km²)	Área (%)
Área Urbana	5,92	57,89
Vegetação Densa	3,63	35,48
Solo Exposto	0,48	4,69
Corpo Hídrico	0,002	0,02
Vegetação Rala	0,20	1,96
Total	**10,23**	**100,00**

Fonte: Autora (2025)

A Tabela acima mostra que a vegetação densa ocupa 35,48% da área total, atuando na proteção de recursos hídricos e na redução dos processos erosivos. O solo exposto que representa 4,69% da área, mostra a falta de cobertura vegetal indicando degradação ambiental ou manejo inadequado do solo**.** Já a vegetação rala, correspondendo a 1,96% da área e está associada a possíveis áreas de pastagem, agricultura de baixa densidade ou início de recuperação vegetal. Por fim, os corpos hídricos, com apenas 0,02% da área total, os quais apresentaram baixa detecção pela composição de bandas e por meio do método *Random Forest*, o que Mapelli (2025) atribui a presença de nuvens, presença de vegetação densa, bem como destaca-se a forte pressão antrópica sobre a área a qual gera forte poluição dos corpos hídricos geradas pela ausência de saneamento básico (Figura 21).

Figura 21 - Presença de corpo hídrico



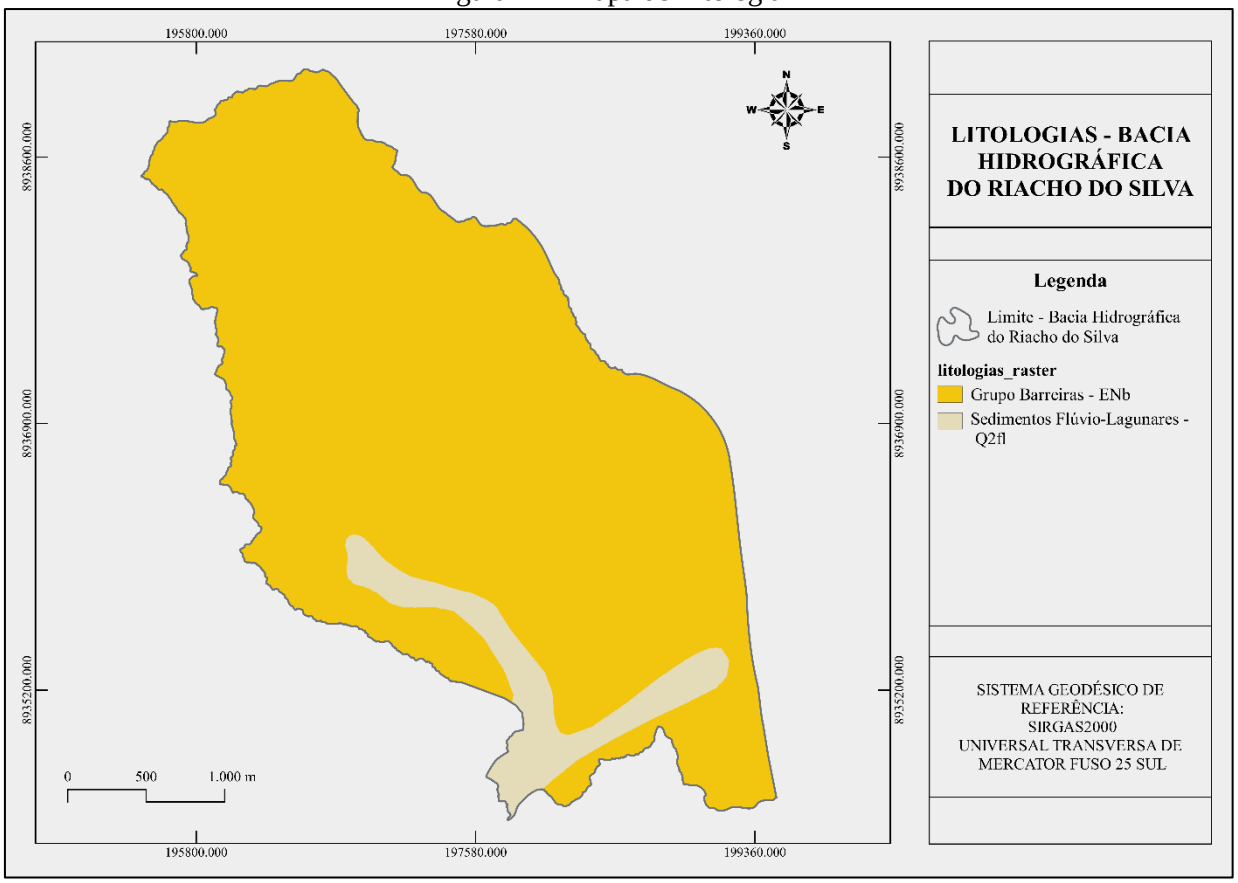
Fonte: Autora (2025)

A Figura 21, mostra o afluente da BHRS, localizado na Grota Santa Helena, no bairro Chã da Jaqueira, em dois trechos distintos, onde se nota fluxo de água, lançamento de efluentes e acúmulo de resíduos. As margens, cobertas por vegetação e próximas a edificações, dificultam a detecção do corpo hídrico.

5.3 Condicionantes Geológicos

A Figura 22, mostra a distribuição espacial dos tipos de rochas e unidades litológicas dentro do limite da BHRS.

Figura 22 - Mapa de Litologia



Fonte: Elaborado de Mendes *et al*., (2017).

De acordo com a Figura, a bacia hidrográfica é predominantemente composta por sedimentos da Formação Barreiras, que ocupam 92,67% de sua área, enquanto os sedimentos Flúvio-Lagunar correspondem a 7,33% do local (Tabela 11). Essa composição indica uma predominância litológica para um trecho, o que tem implicações diretas nos processos de infiltração da água, na suscetibilidade à erosão e na estabilidade geotécnica da bacia, conforme destacado por Mendes *et al.*, (2017).

Tabela 11 - Classes de Litologia

Classes	Área (km²)	Área (%)
ENb	9,48	92,67
Q2fl	0,75	7,33
Total	**10,23**	**100,00**

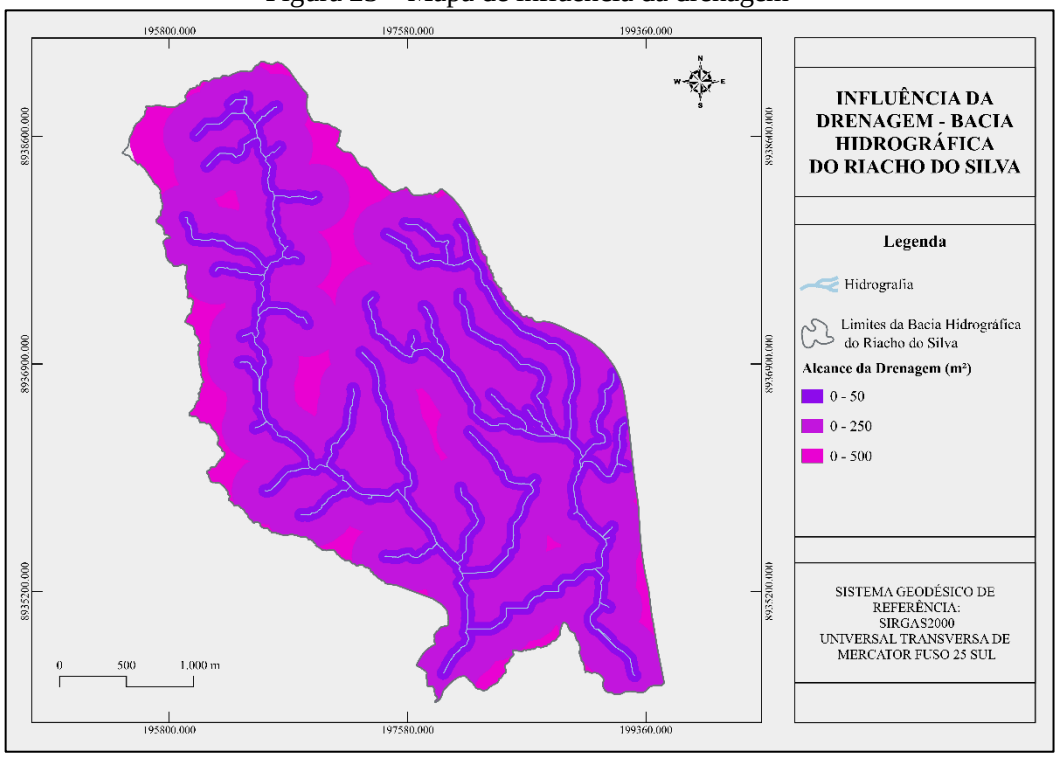
Fonte: Autora (2025)

A Tabela acima, mostra que 9,48 km² da área são compostos por Arenitos – ENb**,** integrantes da Formação Barreiras. Essa litologia, é típica de rochas sedimentares com predominância de grãos de areia e argila, apresenta permeabilidade moderada a baixa e elevada suscetibilidade à erosão quando exposta a intempéries. Por outro lado, sedimentos flúvio-lagunares – Q2fl, caracterizam-se pela predominância de grãos finos silte e argila, baixa permeabilidade e forte propensão à geração de escoamento superficial, o qual Massahud;

Cardoso; Campos (2024) destacam a presença de solos colapsíveis na área, tais características favorecem alagamentos em áreas planas devido à drenagem deficiente, ampliam a instabilidade do terreno durante chuvas intensas tal como podem gerar colapsos de estruturas como indicado por Santos (2022).

Assim, a Figura 23 apresenta a influência da drenagem na BHRS, conforme delimitado pelos três *Buffers* estabelecidos a partir dos corpos hídricos.

Figura 23 – Mapa de influência da drenagem



Fonte: Autora (2025)

A análise do mapa mostra que a presença e o movimento da água podem influenciar as características físicas, ambientais e até socioeconômicas do terreno. A forma como a água drena afeta diretamente a geomorfologia e a ocorrência de desastres. Nesse sentido, o crescimento populacional e a ocupação de áreas com baixas altitudes, principalmente próximas a corpos hídricos, aumentam a suscetibilidade a inundações, tal como ocorrência de erosão hídrica que elevam o aporte de sedimentos nos corpos hídricos, gerando impactos significativos no espaço urbano (CANHOLI, 2015). A distribuição espacial do fluxo hídrico está apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Classes influência da drenagem

Influência (m²)	Área (km²)	Área (%)
0-50	0,91	8,90
0-250	2,81	27,47
0-500	6,50	63,54
Total	**10,23**	**100,00**

Fonte: Autora (2025)

A Tabela apresenta a análise geográfica da BHRS, em que o *buffer* de 0–50 m (0,91 km²) representa a zona mais próxima dos cursos d'água, sujeita a inundações e saturação do solo. O *buffer* de 0–250 m (2,81 km²) delimita uma área intermediária, com forte influência do escoamento superficial. Já o *buffer* de 0–500 m (6,50 km²) indica que cerca de dois terços da bacia estão sob influência direta da rede de drenagem.

5.4 Matriz par a par AHP

Utilizando a escala de Saaty (1987), definiram-se os graus de prioridade e relevância de cada indicador (Tabela 13), o que permitiu a obtenção dos pesos apresentados na Tabela 14.

Tabela 13 - Matriz de comparação pareada

Fatores	Orie. Ver	Curv Vert	Curv Hori	Drenagem	Litologias	Uso solo	Declividade
Orie. Ver	1	½	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7
Curv Vert	2	1	½	1/3	1/4	1/5	1/6
Curv Hori	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5
Drenagem	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4
Litologias	5	4	3	2	1	1/2	1/3
Uso solo	6	5	4	3	2	1	1/2
Declividade	7	6	5	4	3	2	1

Fonte: Autora (2025)

A Tabela 14 exibe os pesos da matriz de comparação pareada dos fatores que influenciam a suscetibilidade. A metodologia empregada, fundamentada no AHP, possibilitou quantificar a prioridade relativa entre critérios por meio de julgamentos comparativos.

Tabela 14 – Obtenção dos pesos

Fatores	Orie Ver	Curv Vert	Curv Hori	Drenagem	Litologias	Uso solo	Decliv.	Pesos	Prioridade Relativa (%)
Orie. Ver	1	0,5	0,333	0,25	0,2	0,1667	0,1428	0,032	3,2
Curv Vert	2	1	0,5	0,333	0,25	0,2	0,1667	0,046	4,6
Curv Hori	3	2	1	0,5	0,333	0,25	0,2	0,070	7,0
Drenagem	4	3	2	1	0,5	0,333	0,25	0,106	10,6
Litologias	5	4	3	2	1	0,5	0,333	0,159	15,9
Uso solo	6	5	4	3	2	1	0,5	0,237	27,3
Declivi.	7	6	5	4	3	2	1	0,350	35,0

Fonte: Autora (2025)

A análise da matriz (Tabela 14) demostrou a hierarquia de influência dos fatores condicionantes na suscetibilidade a MGM na BHRS. A declividade surgiu como o critério mais significativo, com um peso de 35%. Este resultado confirma a literatura, que aponta a inclinação do terreno como o principal controlador da estabilidade de encostas, uma vez que a gravidade atua diretamente sobre a massa do solo, influenciando a tensão de cisalhamento e a infiltração de água (DOU *et al*., 2015; IPT, 2018).

O peso atribuído ao uso e ocupação do solo (27,3%) supera consideravelmente o fator litologia (15,9%). Esta diferença confirma que a ação antrópica é um agente crítico na origem dos desastres na BHRS. O peso maior do uso do solo indica que na área de estudo, a ocupação desordenada, cortes de taludes, remoção da vegetação e impermeabilização do solo, tem um impacto mais determinante na instabilidade do que a própria predisposição geológica do terreno. Esse resultado está de acordo com as observações de Tominaga (2007) sobre as intervenções humanas em áreas naturalmente suscetíveis.

A proximidade com a drenagem (10,6%) também se mostrou um fator considerável. Este peso reflete a importância da saturação dos taludes e do papel da erosão fluvial nas margens, processos que fragilizam a base das encostas e provocam escorregamentos, conforme destacado por Canholi (2015).

Por fim, os parâmetros morfométricos mais específicos como a orientação das vertentes (3,2%) e as curvaturas horizontal (7,0%) e vertical (4,6%), que apresentaram os menores pesos. Uma vez que, sua influência é mais leve e em uma área urbanizada como a BHRS, os indicadores declividade e ação antrópica tornam-se predominantes (POURGHASEMI; PRADHAN; GOKCEOGLU, 2012). A consistência lógica da matriz (RC = 0,0249 < 0,10) válida a confiabilidade desses julgamentos e dos pesos obtidos.

5.5 Registro de campo

A visita de campo foi realizada em pontos previamente definidos, apresentados na Tabela 15. Nessa etapa, constatou-se a presença de construções precárias, impermeabilização do solo e a presença de terrenos íngremes.

Tabela 15 - Pontos visitados

Pontos	Local	Coordenadas
1	Travessa Florestal - Grota Santa Helena	-9.612173,-35.744042
2	R. Antônio Claudino	-9.619475, -35.752302
3	R. Pref. Joatas Malta de Alencar	-9.619475, -35.752302
4	Av. Empresário Jorge Montenegro de Barros	-9.616550, -35.763151

Fonte: Autora (2025)

Conforme apresentado na Tabela 15, o Ponto 1 localiza-se no bairro Chã da Jaqueira (Figura 24). O Ponto 2 corresponde ao deságue do Riacho do Silva na Lagoa Mundaú, situado no bairro do Bebedouro. No Ponto 3, verificou-se a adoção de medidas de proteção de encosta, como o uso de material cimentante (geomanta), além da construção de edificações em áreas suscetíveis a MGM. Já no Ponto 4, observou-se a ocorrência de erosão hídrica, como mostra a Figura 25.

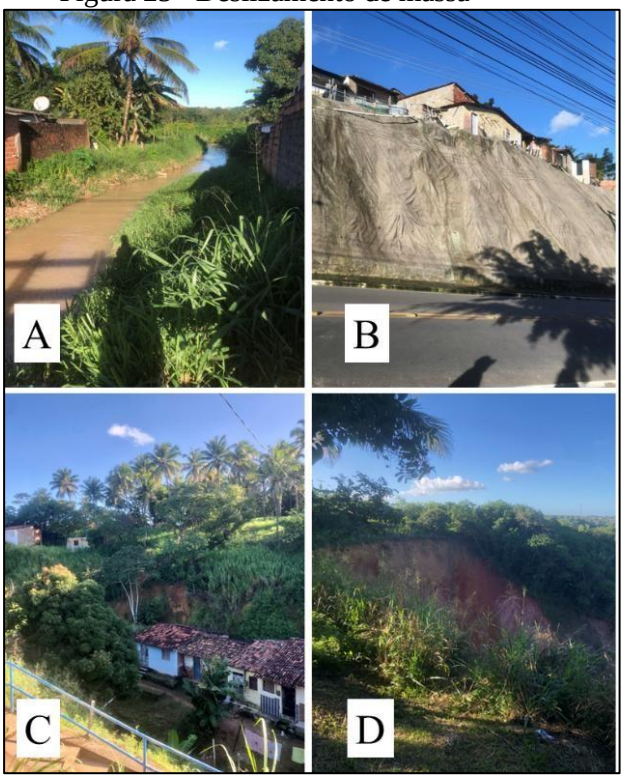
Figura 24 - Deslizamento de massa



Fonte: Autora (2025)

Na Figura 24, observa-se uma área de encosta que sofreu erosão e deslizamento de solo, resultando na ruptura parcial da estrutura na interrupção da continuidade do acesso. A via encontra-se bloqueada e apresenta risco de acidentes, razão pela qual foi instalada uma barreira física de contenção.

Figura 25 - Deslizamento de massa



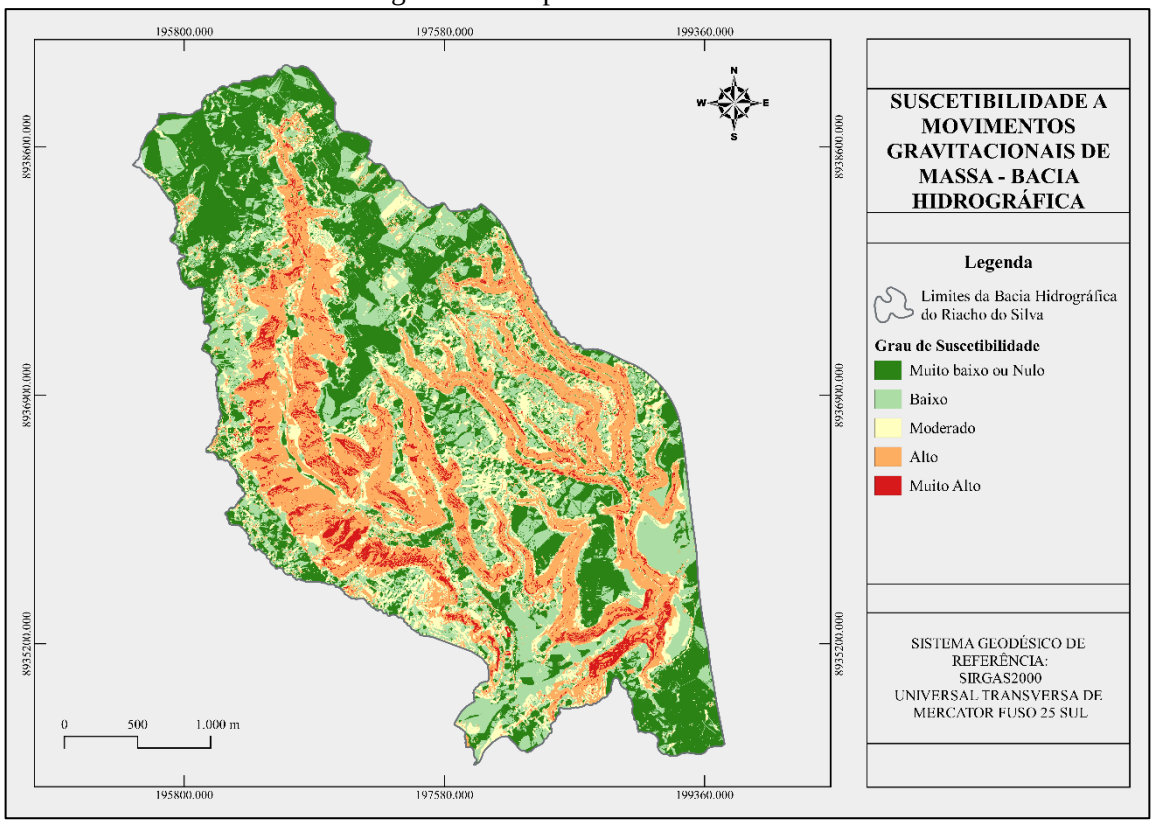
Fonte: Autora (2025)

Conforme ilustrado na Figura 25(a) observa-se o percurso do Riacho do Silva até a Lagoa Mundaú, (b) a presença de residências sobre o topo do talude protegido por geomanta, método utilizado para mitigar processos erosivos e reduzir os impactos das chuvas, (c) construções precárias com indícios de instabilidade, suscetíveis a MGM, e, por fim, (d), evidenciam-se sinais de erosão acelerada do solo, com formação de voçoroca.

5.6 Mapa de suscetibilidade da área da BHRS

A Figura 26 apresenta o mapa de suscetibilidade da Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, em Maceió, classificado em cinco graus (Muito Baixo ou Nulo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto), indicando a probabilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa com base em sete indicadores analisados.

Figura 26 - Mapa de suscetibilidade



Fonte: Autora (2025)

A análise espacial apresentada na Figura acima mostra que os graus Muito Baixo ou Nulo e Alto são as mais significativas, conforme os dados da Tabela 16. Além disso, a BHRS apresenta elevado potencial para a evolução de áreas de risco, visto que está situada em região de topografia acidentada e característico processo de urbanização desordenada. No contexto analisado, a suscetibilidade a MGM está diretamente associada ao relevo e a parâmetros morfométricos, como a declividade, além de fatores geológicos, a exemplo de encostas, tipo de rocha, classe de solo e uso e ocupação do terreno.

Destaca-se que as intervenções antrópicas, como cortes de taludes, construção de moradias, aterros e remoção de vegetação, modificam significativamente a geomorfologia local, contribuindo para a formação de terrenos modificados pela ação humana, conforme Tominaga (2007). Como consequência, tais modificações, somadas à presença de

infraestruturas hidráulicas inadequadas, podem intensificar processos erosivos e aumentar a instabilidade das encostas, assim destaca Canholi, 2015.

Nesse contexto, a declividade destaca-se por influenciar diretamente a ação da gravidade, controlando o transporte, a velocidade e o alcance dos materiais em movimento, especialmente em áreas de maior inclinação, conforme (DOU *et al.*, 2015).

Geologicamente, essas áreas estão inseridas na planície flúvio-lagunar, composta por rochas sedimentares com predominância de areia e silte argiloso. Esses materiais possuem permeabilidade de moderada a baixa e alta suscetibilidade à erosão quando expostos aos intemperismos, conforme citado por Massahud; Silva; Campos (2024).

Dessa forma, a ocorrência de MGM na bacia é resultado direto da forma de ocupação adotada, a qual é caracterizada pelo desmatamento e pelas modificações nos taludes, onde as construções foram realizadas sem a aplicação de práticas adequadas de conservação do solo e de engenharia, segundo Santos (2022).

Em síntese, as áreas mapeadas concentram populações de baixa renda que ocupam encostas íngremes. Portanto, as características físicas do terreno, quando somadas à ocupação urbana desordenada, resultam em significativos impactos ambientais e socioeconômicos.

Tabela 16 - Classificação do grau de suscetibilidade a MGM

Grau	Área (km²)	Área (%)
Muito baixo ou nulo	2,90	28,43
Baixo	2,52	24,71
Moderado	1,44	14,12
Alto	2,90	28,43
Muito Alto	0,44	4,31
Total	**10,20**	**100,00**

Fonte: Autora (2025)

De acordo com a Tabela acima, 32,74% da bacia apresenta suscetibilidade alta ou Muito Alta, que são classes de maior risco. Indicando assim, que a área é potencialmente suscetível a MGM, sendo superior aos valores obtidos por Gama; Falcão (2023), os quais tiveram como somatório 21,62% da área da bacia para as mesmas classes.

Com base na classificação obtida a partir do mapa de suscetibilidade, observou-se que as classes Alta e Muito Alta de risco estão predominantemente associadas a taludes com elevada declividade. Nesse contexto, a Tabela 17 apresenta a distribuição das áreas com grau de suscetibilidade Alto e Muito Alto em cada bairro analisado.

Tabela 17 - Grau de Suscetibilidade para cada bairro da BHRS

Bairro	Alto Área (km²)	Muito Alto Área (km²)
Bebedouro	0,074	0,016
Pinheiro	0,02	0,003
Gruta de Lourdes	0,158	0,039
Santa Amélia	0,052	0,002
Tabuleiro dos Martins	0,188	0,023
Santo Amaro	0,070	0,005
Chã da Jaqueira	0,392	0,055
Chã de Bebedouro	0,174	0,051
Petrópolis	1,770	0,249
Jardim Petrópolis	0	0
Canaã	0	0
Santa Amelia	0	0
Total	**2,900**	**0,440**

Fonte: Autora (2025)

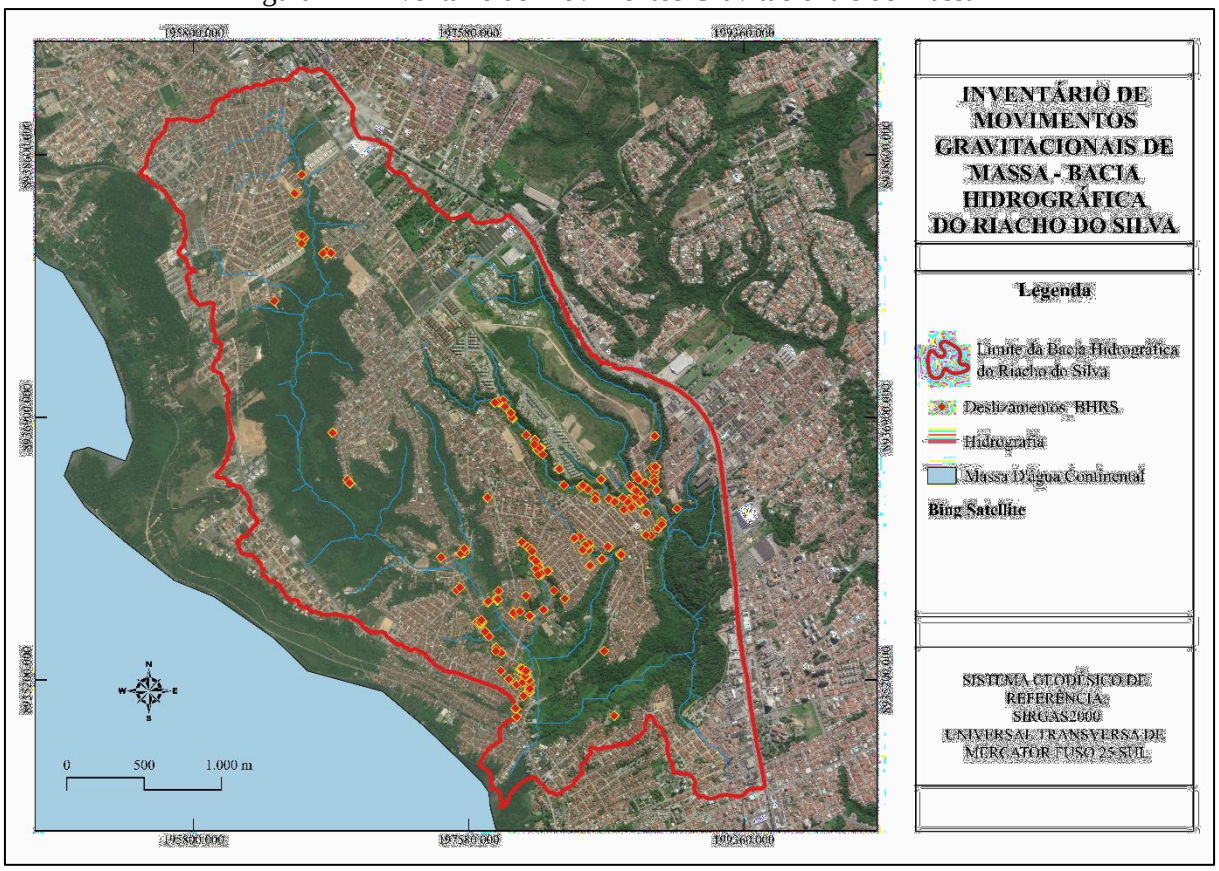
Conforme a tabela, o bairro Petrópolis se destaca por concentrar as maiores áreas com grau de suscetibilidade Alto (1,770 km²) e Muito Alto (0,249 km²), configurando a principal zona crítica da BHRS. Os bairros Chã da Jaqueira e Chã do Bebedouro também apresentam valores expressivos nessas classes. Por outro lado, Jardim Petrópolis e Canaã não possuem áreas inseridas nos graus mais elevados. No total, foram identificados 2,900 km² de áreas com suscetibilidade Alta e 0,440 km² com suscetibilidade Muito Alta.

Nesse sentido, priorizou-se a verificação da probabilidade de a área urbanizada ser afetada, considerando os graus de suscetibilidade Alto e Muito Alto em relação ao uso e ocupação do solo. Como resultado, obtiveram-se áreas afetadas de aproximadamente 0,70 km² para o grau Alto e 0,02 km² para o grau Muito Alto, destacando-se, assim, a importância de ações mitigadoras para a ocorrência de MGM.

5.7 Validação do Modelo

Para a elaboração do mapa de inventário de movimentos gravitacionais de massa, foram utilizados os registros de deslizamentos fornecidos pelo COMPDEC. Esses eventos foram identificados e representados por pontos nas áreas de ruptura dos taludes, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Inventário de Movimentos Gravitacionais de Massa

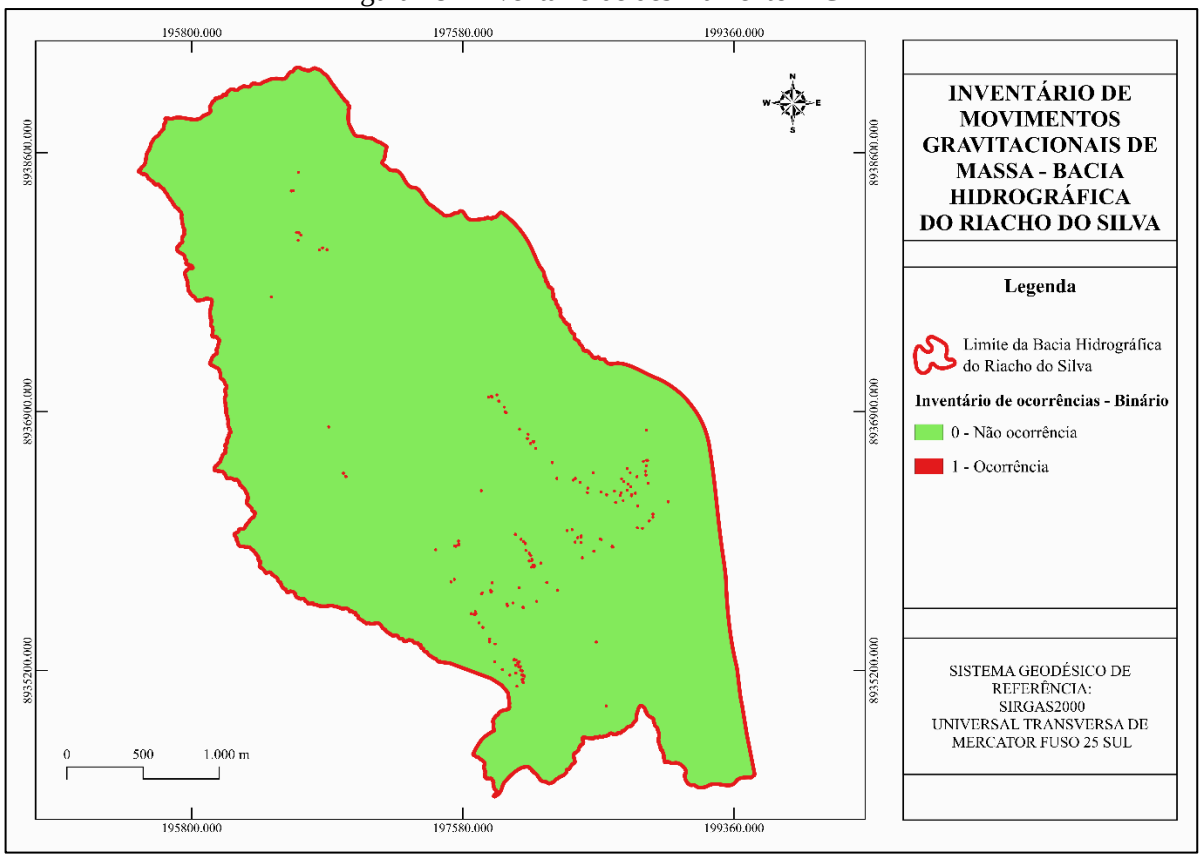


Fonte: Elaborado de COMPDEC - Maceió (2025).

Observa-se no mapa acima, que os MGM registrados dentro dos limites da BHRS, ocorreram principalmente em áreas afetadas por intervenções antrópicas. De acordo com Araújo (2023) o uso do inventario é fundamental para entender os processos de instabilização de encostas e localizar áreas com características semelhantes, permitindo a utilização de medidas que contribuam para evitar maiores desastres.

A partir do inventário de ocorrências cedido pela Defesa Civil de Maceió, na área da bacia, foi gerado o mapa binário, como mostra a Figura 28, a seguir.

Figura 28 - Inventário de deslizamento MGM

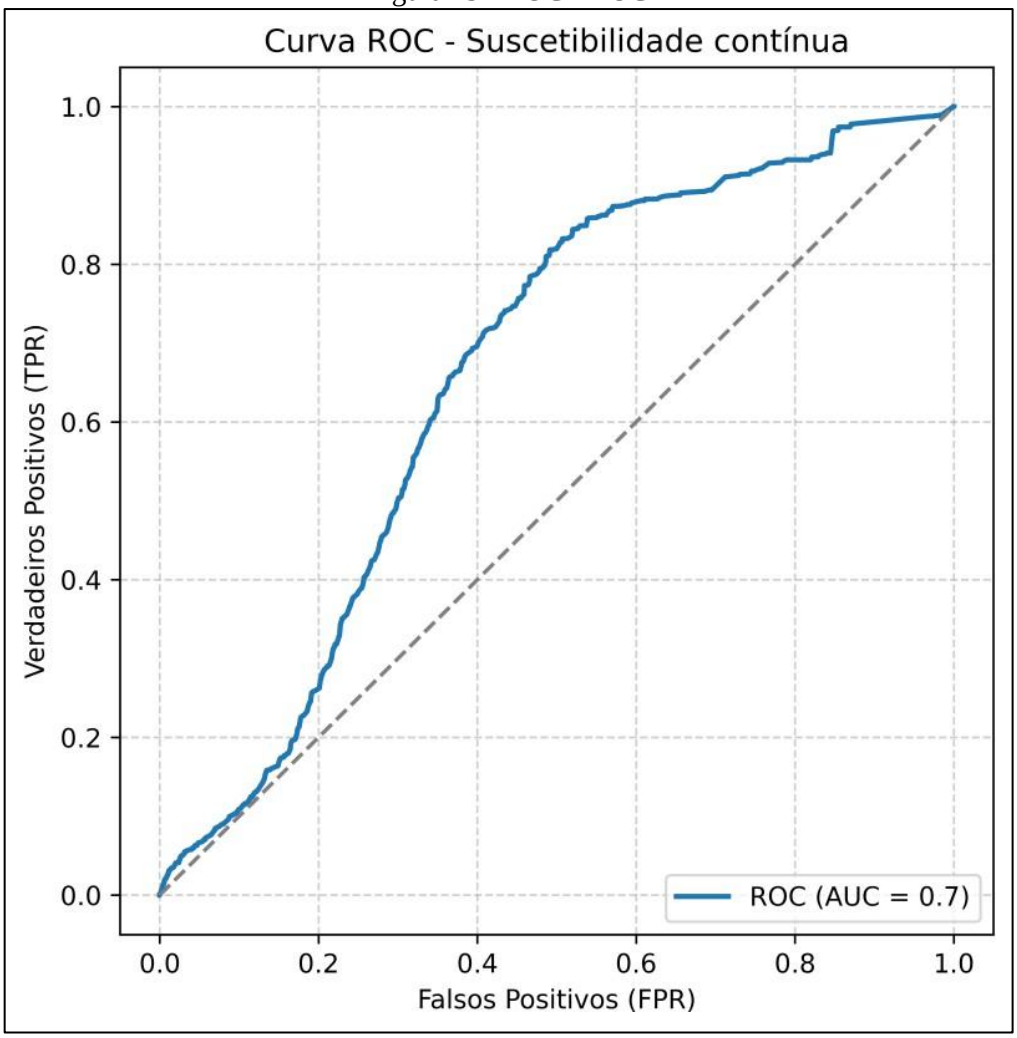


Fonte: Elaborado de COMPDEC-Maceió (2025)

Como base na Figura 28, o mapa classificou com o valor 0 (**não ocorrências**) as áreas para as quais não há registros de eventos pela Defesa Civil de Maceió, e com valor 1 aqueles onde, de fato, ocorreram eventos de MGM, totalizando 185 eventos no intervalo de tempo entre 2020 e 2025. Essa classificação permitiu a sobreposição dos dados ao mapa de suscetibilidade, possibilitando a verificação por meio de uma análise pixel a pixel e a consequente validação dos dados.

Os resultados dessa validação serão apresentados na Figura 29, por meio do gráfico da curva ROC-AUC.

Figura 29 - ROC - AUC



Fonte: Autora (2025)

A validação do modelo, por meio da Curva ROC (Figura 29), resultou em um valor de AUC (Área Sob a Curva) de 0,7. Conforme a classificação proposta por Bahrami, Hassani e Maghsoudi (2021), esse valor é considerado aceitável, indicando que o modelo possui uma capacidade discriminatória 70% superior à de uma classificação aleatória. Ou seja, o modelo demonstra uma habilidade moderada, porém significativa, de prever a localização espacial dos eventos de MGM inventariados na área de estudo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O mapeamento da suscetibilidade mostrou-se eficiente na classificação dos graus de áreas com maior probabilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa do tipo deslizamento na Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva. Esses resultados evidenciam a aplicabilidade da matriz de processos hierárquicos analíticos na modelagem da suscetibilidade, bem como a escolha adequada dos fatores utilizados na álgebra de mapas, cuja consistência foi confirmada na validação do produto final, que apresentou poder preditivo aceitável. Com isso, o mapeamento se consolida como uma ferramenta útil e confiável para a previsão de deslizamentos ao longo da bacia.

Ressalta-se que a gestão municipal já vem adotando intervenções voltadas à proteção dos taludes na área da bacia, como o uso de material cimentante (geomanta) e a aplicação de lonas. Embora essas ações sejam paliativas, mostram-se eficazes a curto prazo.

Diante disso, recomenda-se a atualização do plano municipal de redução de risco, visando identificar os setores existentes na bacia e orientar a implementação de medidas estruturais (obras de contenção e recuperação das encostas) e não estruturais (ações de educação em risco nas escolas, capacitação de professores e fortalecimento das práticas de defesa civil). Também se reforça a necessidade de efetivar o plano municipal de saneamento básico e de aplicar o ordenamento territorial para evitar a expansão das áreas de risco. Além disso, torna-se fundamental incorporar soluções baseadas na natureza para recuperação e proteção dos taludes.

Por fim, destaca-se que esta pesquisa contribui como um guia prático para a tomada de decisão e para o planejamento de ações integradas voltadas à redução de deslizamentos planares na Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, subsidiando intervenções mais eficientes e sustentáveis para a melhoria da qualidade de vida da população local.

7 REFERÊNCIAS

ABAY, A.; BARBIERI, G.; WOLDEAREGAY, K. GIS-based Landslide Susceptibility Evaluation Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach: The Case of Tarmaber District, Ethiopia. **Momona Ethiopian Journal of Science**, v. 11, n. 1, p. 14, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.4314/mejs.v11i1.2

ALCANTARA, K. C.; BRITO, M. de F. L. de; SILVA, C. R. M. da; MORAIS, D. M. F. de; PEREIRA, C. dos S. **Carta geológica: folha SC.25-V-C-IV, Maceió**. *[S. l.]*: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2023. Disponível em: http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/24474. Acesso em: 10 set. 2025.

ARAÚJO, B. H. B. **Mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massas no município de Areia-PB.** 2023. - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP**. 1992. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

BAHRAMI, Y.; HASSANI, H.; MAGHSOUDI, A. Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. **GeoJournal**, v. 86, n. 4, p. 1797–1816, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y

BAHRAMI, Y.; HASSANI, H.; MAGHSOUDI, A. Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. **GeoJournal**, v. 86, n. 4, p. 1797–1816, 2021 b. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y

BARBOSA, I.; DE MELLO, F. L.; DA SILVA, L. F. C. F. REGISTRO DE FEIÇÕES SOBRE A SUPERFÍCIE DE UMA REDE TRIANGULAR IRREGULAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 1, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.14393/rbcv61n1-44850

BEZERRA, L. T. V. **Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN**. 2019. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, *[s. l.]*, 2019.Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/27676. Acesso em: 23 ago. 2025.

BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making**. London: Springer London, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1007/b97668

BRESSAN, F. O MÉTODO DO ESTUDO DE CASO. p. 0–18, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Bressan-2/publication/376646085_O_METODO_DO_ESTUDO_DE_CASO/links/65820f023c472d2e8e70b91f/O-METODO-DO-ESTUDO-DE-CASO.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

BRUNELLI, M. **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. Cham: Springer International Publishing, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-12502-2

CANHOLI, Aluísio. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. *[S. l.]*: Oficina de Textos, 2015.

CASTRO, M. A. de S. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil. 2011. Disponível em: http://www.lloyds.com/News_Centre/360_risk_insight/The_debate_on_climate_change/. Acesso em: 23 ago. 2025.

CONCEIÇÃO, D. N. da. **Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa e inundações/alagamentos na área urbana de Maceió, Alagoas**. 2023. *[s. l.]*, 2023.Disponível em: http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/13978. Acesso em: 23 ago. 2025.

COROMINAS, J. *et al.* Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

CPRM. **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): volume II, relatórios técnicos**. *[S. l.]*: CPRM, 2019. Disponível em: http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/21134. Acesso em: 26 ago. 2025.

DOU, J.; TIEN BUI, D.; P. YUNUS, A.; JIA, K.; SONG, X.; REVHAUG, I.; XIA, H.; ZHU, Z. Optimization of Causative Factors for Landslide Susceptibility Evaluation Using Remote Sensing and GIS Data in Parts of Niigata, Japan. **PLOS ONE**, v. 10, n. 7, p. e0133262, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262

EMBRAPA. **Definição de Solo**. *[s. l.]*, 2025.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. *[S. l.: s. n.]*. *E-book*. Disponível em: https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

FARIA, D. G. M. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)**. 2011. - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.Disponível em: https://doi.org/10.11606/T.18.2011.tde-08122011-110908

FARIA, G. M. G.; CAVALCANTI, V. R. Sistema de Espaços Livres da Cidade de Maceió. **Paisagem e Ambiente**, n. 26, p. 7, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.v0i26p7-28

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.20502/rbg.v2i1.8

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia conceitos e tecnologias atuais**. *[S. l.]*: Oficina de Textos, 2008.

FREITAS, A. J. de C. **Transformações urbanas e vulnerabilidade: estudo sobre as condicionantes socioambientais da região da Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, Maceió/AL**. 2022. - Universidade Federal de Santa Catarina, *[s. l.]*, 2022.Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244415. Acesso em: 23 ago. 2025.

GAMA, W. M.; FALCÃO, N. A. de M. SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS PELO MÉTODO ESTATÍSTICO BIVARIADO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO SILVA, MACEIÓ, ALAGOAS, BRASIL. **Revista Contexto Geográfico**, v. 8, n. 16, p. 46–61, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.28998/contegeo.8i16.15478

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. *[S. l.]*: Oficina de Textos, 2016.

H. MEZUGHI, T.; AKHIR, J. M.; RAFEK, A. G.; ABDULLAH, I. Analytical Hierarchy Process Method for Mapping Landslide Susceptibility to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli), Malaysia. **Asian Journal of Earth Sciences**, v. 5, n. 1, p. 13–24, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.3923/ajes.2012.13.24

HENRIQUE, H. M. **Mapa de risco a deslizamento e erosão do bairro de Rurópolis, município do Ipojuca-PE**. 2014. - Universidade Federal de Pernambuco, *[s. l.]*, 2014.Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/14235. Acesso em: 23 ago. 2025.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O Manual de Deslizamento-Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos Serviço Geológico do Canadá**. *[S. l.: s. n.]*.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14–47, 1981 a. Disponível em: https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918

HUNGR, O.; EVANS, S. G.; BOVIS, M. J.; HUTCHINSON, J. N. A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental and Engineering Geoscience**, v. 7, n. 3, p. 221–238, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221
IFB. **Modelagem**. *[s. l.]*, 2025. Disponível em: https://www.ifb.edu.br/attachments/article/14433/Modelagem.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

IPT. **Elaboração do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) para o Município de São Sebastião, SP** *[S. l.: s. n.]*

IPT. **MAPEAMENTO DE RISCOS EM ENCOSTAS E MARGENS DE RIOS**. *[S. l.: s. n.]*.

JANAÍNA FURTADO; MARCOS DE OLIVEIRA; MARIA CRISTINA DANTAS; PEDRO PAULO SOUZA; REGINA PANCERI. **Capacitação Básica em DEFESA CIVIL**. *[s. l.]*, 2012. Disponível em: https://www.defesacivil.pr.gov.br/sites/defesa-civil/arquivos_restritos/files/documento/2018-12/CapacitcaoBasicaemDefesaCivil.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.

JORNAL EXTRA. **Deslizamentos provocam mortes em Maceió - Jornal Extra de Alagoas**. *[s. l.]*, 2017. Disponível em: https://ojornalextra.com.br/noticias/alagoas/2017/05/26001-deslizamentos-provocam-mortes-em-maceio. Acesso em: 26 ago. 2025.

LEÃO, V.; FARIAS, M.; AMARAL, R. **Bebê de 10 meses desaparece após queda de barreira na Chã da Jaqueira, em Maceió | Alagoas | G1**. *[s. l.]*, 2021. Disponível em: https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2021/06/15/bebe-desaparece-apos-queda-de-barreira-na-cha-da-jaqueira-em-maceio.ghtml. Acesso em: 23 ago. 2025.

LEMOS, J. R. **Bebedouro: comunidade e história de fé.** 1. ed. *[S. l.]*: Grafcerta, 2003.
LIMA, G. J. C. F. de. MAPA DE INUNDAÇÃO COMO FERRAMENTA AO CONTROLE DE INUNDAÇÕES: o caso de Maceió-AL FLOOD MAP AS A TOOL TO CONTROL OF FLOODS: the case of Maceió-AL. *In*: 2013, **Anais [...]**. *[S. l.: s. n.]*

MAPELLI, L. R. **Aplicação de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina na estimativa de turbidez de corpos hídricos.** 2025. - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.Disponível em: http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/7714. Acesso em: 17 set. 2025.

MASSAHUD, R. T. L. R.; SILVA, A. C.; CAMPOS, F. A. da S. ANÁLISE DE PERIGOS EM SETOR DE RISCO GEOLÓGICO DO COMPLEXO LAGOA MUNDAÚ EM MACEIÓ-AL. *In*: 2024, **Anais [...]**. *[S. l.: s. n.]*

MENDES, V. A.; LIMA, M. A. B.; MORAES, D. M. F.; BRITO, M. de F. L. Geologia e recursos minerais do estado de Alagoas: escala 1:250.000. **CPRM - Serviço Geológico do Brasil**, p. 113, 2017. Disponível em: http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/17649. Acesso em: 26 ago. 2025.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1. ed. *[S. l.]*: Oficina de Textos, 2007.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Assentamento Precários no Brasil Urbano**. *[s. l.]*, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/publicacoes/habitacao/assentamento-precarios-no-brasil-urbano. Acesso em: 23 ago. 2025.

NASCIMENTO JÚNIOR, A. R.; LEITE, B. A.; MALTA, C. K.; SOARES, D. M.; SILVA, L. M. T. C.; BASTOS, M. K. L.; CASTRO, R. de A. L.; MARQUES, R. C. C.; NORMANDE, T. B. IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NO RIACHO DO SILVA NA CIDADE DE MACEIÓ-AL. *In*: 2004, **Anais [...]**. *[S. l.: s. n.]*Disponível em: https://www.sbpcnet.org.br/livro/56ra/banco_senior/RESUMOS/resumo_1497.html. Acesso em: 23 ago. 2025.

NERY, T. D. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia da ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. 2011. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.Disponível em: https://doi.org/10.11606/D.8.2011.tde-26082011-095230

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas em Rede Um Olhar Interdisciplinar**. 1. ed. Bauru-SP: Canal6 Editora, 2017.

OLIVEIRA, M. A. T. **Movimentos gravitacionais de massa: avaliação do risco geotécnico para edificações próximas ao Morro da Forca, no distrito sede do município de Ouro Preto, por meio do Método do Índice de Risco (iR).** 2022. - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

ONU. **90% das mortes por desastres naturais ocorreram em países em desenvolvimento**. *[s. l.]*, 2023.

PENA, R. F. A. **Formação dos solos. Processo de formação dos solos - Mundo Educação**. *[s. l.]*, 2025. Disponível em: https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/formacao-dos-solos.htm. Acesso em: 23 ago. 2025.

PIRATELLI, C. L.; BELDERRAIN, M. C. N. SUPPORTING THE DESIGN OF A PERFORMANCE MEASUREMENT SYSTEM WITH THE ANALYTIC NETWORK PROCESS. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, v. 2, n. 1, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.13033/ijahp.v2i1.72

POURGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, v. 63, n. 2, p. 965–996, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2

QUEIROZ, L. R.; MARCHEZINI, V.; RODRIGUEZ, D. A. Evolução da capacidade institucional da RMSP em relação às mudanças climáticas. **Cadernos Metrópole**, v. 25, n. 58, p. 829–852, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5803

REDIN VESTENA, L.; AP. ALMEIDA DOS SANTOS, R.; EURICH MACHADO, F.; FRAJUCA LOPES, J. S. F. L. Análise temporoespacial de edificações em áreas de perigo de inundação em Guarapuava, Paraná, Brasil. **Geografares**, v. 4, n. 39, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.47456/geo.v4i39.45212

ROCHA, B. O.; KÖRTING, T. S.; NAMIKAWA, L. M. Processamento de Imagens dos Satélites Brasileiros CBERS-4 e CBERS-4A para Respostas Rápidas a Desastres. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 76, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-70194

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

SAATY, T. L. **Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process**. 1. ed. *[S. l.: s. n.]*. *E-book*. Disponível em: https://www.amazon.com/Fundamentals-Decision-Priority-Analytic-Hierarchy-ebook/dp/B00CNI4E2M. Acesso em: 23 ago. 2025.

SAATY, T. L. Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. *In*: *[S. l.: s. n.]*. p. 15–35. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. Boston, MA: Springer US, 2012. v. 175. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6

SANTOS, A. R. dos; MOREIRA, T. R.; SILVA, J. P. M.; SCARAMUSSA, L. M.; BORGES, L. A. C.; FERRARI, J. L. **Método AHP (Analytic Hierarchy Process) + Aplicativo Web MG-AHP no QGIS**. *[S. l.]*: CAUFES, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.29327/5418974

SANTOS, J. C. **Mapeamento e caracterização Geotécnica da formação barreiras no município de Maceió, Alagoas**. 2022. - Universidade Federal de Pernambuco, *[s. l.]*, 2022.Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48402. Acesso em: 23 ago. 2025.

SCHRAMM, L. F. P.; OSAKO, L. S. ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES E CARACTERIZAÇÃO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA DO DESASTRE DE DEZEMBRO DE 2020, NA PORÇÃO NORDESTE DA MICROBACIA DO RIO DAS COBRAS, RIO DO SUL (SC). *In*: 2023, **Anais [...]**. : UFRGS, 2023.

SIDLE, R. C.; OCHIAI, H. **Landslides: Processes, Prediction, and Land Use**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2006. v. 18. Disponível em: https://doi.org/10.1029/WM018

SILVA, R. M. N. **MAPEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE A OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA EM PACOTI (CE)**. 2021. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, Fortaleza, 2021.

SILVA, V. M. F. DA. **EFEITO DAS AÇÕES ANTRÓPICAS NA QUALIDADE DA ÁGUA DA BACIA DO RIACHO DO SILVA, EM MACEIÓ-AL**. 2011. - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.Disponível em: www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs. Acesso em: 25 ago. 2025.

SILVA, V. M. F. da; AGRA, T. A.; FREIRE, P. A. F.; ALVES, I.; BATISTA, E. A.; JÚNIOR, C. R. F. DEPOSIÇÃO INADEQUADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS AO LONGO DA BACIA DO RIACHO DO SILVA. 2011.

SUPORTE GEOGRÁFICO. **TAREFA VIRTUAL - FORMAS DE RELEVO**. *[s. l.]*, 2025. Disponível em: https://www.suportegeografico.online/2020/04/tarefa-virtual-formas-de-relevo.html. Acesso em: 23 ago. 2025.

TAQUEZ, D. E. D. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: estudo de caso no centro de lançamentos da barreira do inferno - Brasil**. 2017. *[s. l.]*, 2017.Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/23723. Acesso em: 23 ago. 2025.

TIRADENTES, L. ACIDENTES GEOGRÁFICOS OU FORMAS DO RELEVO? CONCEITOS PARA O ENSINO DE GEOGRAFIA. **Revista de Ciências Humanas**, v. 1, n. 21, 2021. Disponível em: https://periodicos.ufv.br/RCH/article/view/11840. Acesso em: 23 ago. 2025.

TOMAZZOLI, E. R. **MEMORIAL de ATIVIDADES ACADÊMICAS (MAA)**. 2016. - Universidade Federal de Santa Catarina, *[s. l.]*, 2016.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba,SP**. 2007. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.Disponível em: https://doi.org/10.11606/T.8.2007.tde-18102007-155204

TOMINAGA, L. K.; FERREIRA, C. J.; VEDOVELLO, R.; TAVARES, R.; SANTORO, J.; SOUZA, C. R. de G. Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas Tominaga, Lídia Keiko. 2015.

UNDRR. **Disaster losses and damages data | UNDRR**. *[s. l.]*, 2025. Disponível em: https://www.undrr.org/building-risk-knowledge/disaster-data. Acesso em: 23 ago. 2025.

VALERIANO, M. de M. **TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOMORFOLÓGICOS LOCAIS** . São José dos Campos: *[s. n.]*, 2008. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/api/records/75c14312-6bb9-47c2-ad0f-ce36d48ecaf3/attachments/guia_utilizacao_dados_topodata.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. **National Academy of Sciences**, 1978.

VELOSO, A. Importância do Estudo das Vertentes. **GEOgraphia**, v. 4, n. 8, p. 79, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2002.v4i8.a13434

YALCIN, A. 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. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2007.01.003. Acesso em: 24 ago. 2025.

ZEZZO, L. V.; COLTRI, P. P. Educação em mudanças climáticas no contexto brasileiro. **Terrae Didatica**, v. 18, p. e022039, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.20396/td.v18i00.8671305

ZHANG, W.; LIU, S.; WANG, L.; SAMUI, P.; CHWAŁA, M.; HE, Y. Landslide Susceptibility Research Combining Qualitative Analysis and Quantitative Evaluation: A Case Study of Yunyang County in Chongqing, China. **Forests**, v. 13, n. 7, p. 1055, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/f13071055