

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A INUNDAÇÕES NO ESTADO ESPÍRITO SANTO: APLICAÇÃO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E GEOPROCESSAMENTO

Gabriel Adão Zechini da Silva

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil
gabrielzechini@hotmail.com

Sidney Sara Zanetti

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil
sszanetti@yahoo.com.br

RESUMO

Os eventos climáticos extremos, especialmente as inundações, têm gerado grandes impactos ambientais nas cidades brasileiras, como perdas humanas, desabrigados e danos econômicos. Esses impactos são mais severos em áreas urbanas próximas a rios, em razão da ocupação inadequada do solo e da falta de infraestrutura e drenagem. Este estudo tem como objetivo mapear as áreas suscetíveis a inundações no estado do Espírito Santo, utilizando técnicas de geoprocessamento e análise multicritério. Foram considerados dados de precipitação, uso do solo e características geomorfológicas, aplicando-se a técnica AHP para ponderar os critérios de inundação. A combinação desses critérios permitiu a classificação das áreas, revelando que a maior parte da região apresenta grau de suscetibilidade de moderado a muito alto. Quantitativamente, as áreas foram distribuídas da seguinte forma: muito baixo (2,7 km²), baixo (9.743,8 km²), moderado (24.563,5 km²), alto (8.717,7 km²) e muito alto (2.549,4 km²). O modelo HAND mostrou-se eficaz na identificação de áreas suscetíveis próximas aos cursos d'água. O mapeamento gerado é essencial para o planejamento de políticas públicas e para a formulação de estratégias de mitigação de desastres naturais, recomendando-se o uso contínuo dessas tecnologias a fim de aprimorar a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Gestão de Recursos Hídricos. Inundação. Precipitação.

MAPPING FLOOD-SUSCEPTIBLE AREAS IN THE STATE OF ESPÍRITO SANTO: APPLYING MULTICRITERIA ANALYSIS AND GEOPROCESSING

ABSTRACT

Extreme weather events, particularly floods, have caused significant environmental impacts in Brazilian cities, including human losses, homelessness, and economic damage. They are particularly harmful in urban areas near rivers due to improper land use and inadequate infrastructure and drainage. This study aims to map areas susceptible to flooding in the state of Espírito Santo, using geoprocessing and multicriteria analysis. Additionally, precipitation data, land use, and geomorphological characteristics were considered, with the AHP technique used to weigh the flooding criteria. The combination of these criteria allowed classification of the areas, revealing that most of the region shows a susceptibility level ranging from moderate to very high. Quantitatively, the susceptibility areas were distributed as follows: very low (2.7 km²), low (9,743.8 km²), moderate (24,563.5 km²), high (8,717.7 km²), and very high (2,549.4 km²). The HAND model was effective in identifying susceptible areas near watercourses. The generated mapping is essential for planning public policies and natural disaster mitigation strategies, and it recommends the continued use of these technologies to improve water resource management.

Keywords: Water Resources Management. Flooding. Precipitation.

INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos têm impactado diversas cidades brasileiras de forma recorrente e significativa, manifestando-se por meio de ondas de calor, estiagens e inundações. Entre esses

eventos, as inundações se destacam como as mais frequentes no país, trazendo graves consequências socioambientais, como perdas humanas, desabrigados, epidemias e prejuízos econômicos (Loureiro et al., 2014).

As inundações urbanas, por sua vez, são amplamente abordadas em estudos acadêmicos, governamentais e empresariais, devido aos impactos devastadores que causam tanto às comunidades humanas quanto aos ecossistemas naturais. Esses eventos, em particular, podem resultar em grandes perdas financeiras, sociais e culturais, configurando-se como um problema recorrente em diversas cidades (Leal; Barbosa; Aquino, 2020).

Nesse contexto, de acordo com Furlan e Trentin (2021), as inundações estão diretamente relacionadas à ocupação inadequada das áreas próximas aos cursos d'água, o que inclui tanto a supressão da mata ciliar quanto a redução das seções transversais dos rios. Assim, as áreas urbanas tornam-se particularmente vulneráveis, pois, além de estarem localizadas em regiões propensas a inundações, enfrentam problemas como a impermeabilização do solo e a falta de infraestrutura adequada de drenagem.

A identificação e delimitação de áreas suscetíveis a inundações, por meio de técnicas de geoprocessamento, surgem como alternativas não estruturais eficazes, oferecendo uma abordagem valiosa para diagnosticar as regiões mais vulneráveis a esses eventos. Essas ações desempenham papel essencial no planejamento do uso e ocupação do solo, contribuindo para um ordenamento territorial mais eficiente e seguro (Garcia; Dourado; De Avila, 2022).

Nesse sentido, o modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) foi inicialmente aplicado por Gharari et al. (2011) para classificação hidrológica, incluindo áreas como banhados, encostas e topos de morros. De maneira semelhante, Nobre et al. (2011) utilizaram o HAND para o mapeamento e a análise espacial de características hidrológicas dos solos na região Amazônica. Esse modelo, ao considerar a altura relativa em relação à drenagem, mostra-se particularmente útil para identificar áreas mais propensas a alagamentos, sendo uma ferramenta relevante na análise de risco de inundações.

De acordo com Corseuil (2006), a análise multicritério destaca-se como uma ferramenta lógica que possibilita a comparação de diferentes cenários com base em critérios previamente definidos, servindo de apoio a processos de tomada de decisão. Assim, a técnica de análise multicritério, associada ao método do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP), desenvolvido originalmente por Saaty (1977) para aplicações corporativas, permite a incorporação de múltiplas perspectivas no processo decisório.

Conforme observado por Saaty (1994), uma das vantagens desse método é a possibilidade de fundamentar as comparações entre alternativas tanto em dados objetivos quanto nas intuições e experiências dos envolvidos.

O método AHP possibilita a criação de uma hierarquia de decisões, na qual diferentes níveis de importância são atribuídos a cada critério, proporcionando uma visão mais abrangente das interações no processo decisório. A priorização das alternativas, levando em consideração a relevância de cada critério, auxilia os tomadores de decisão a visualizar o sistema de forma mais clara, o que facilita a identificação das áreas com maior risco de inundações.

O AHP fundamenta-se em três princípios do pensamento analítico, conforme Costa (2002): a construção de hierarquias, a definição de prioridades e a consistência lógica.

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo mapear as áreas suscetíveis a inundações no estado do Espírito Santo, utilizando a técnica de análise multicritério em ambiente de geoprocessamento, com ênfase em critérios ambientais que influenciam a ocorrência desses eventos.

METODOLOGIA

Área de estudo

Segundo dados do Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o estado do Espírito Santo possui uma área total de 46.074,448 km² e uma população de 3.833.712 habitantes, resultando em uma densidade demográfica média de 83,21 habitantes/km².

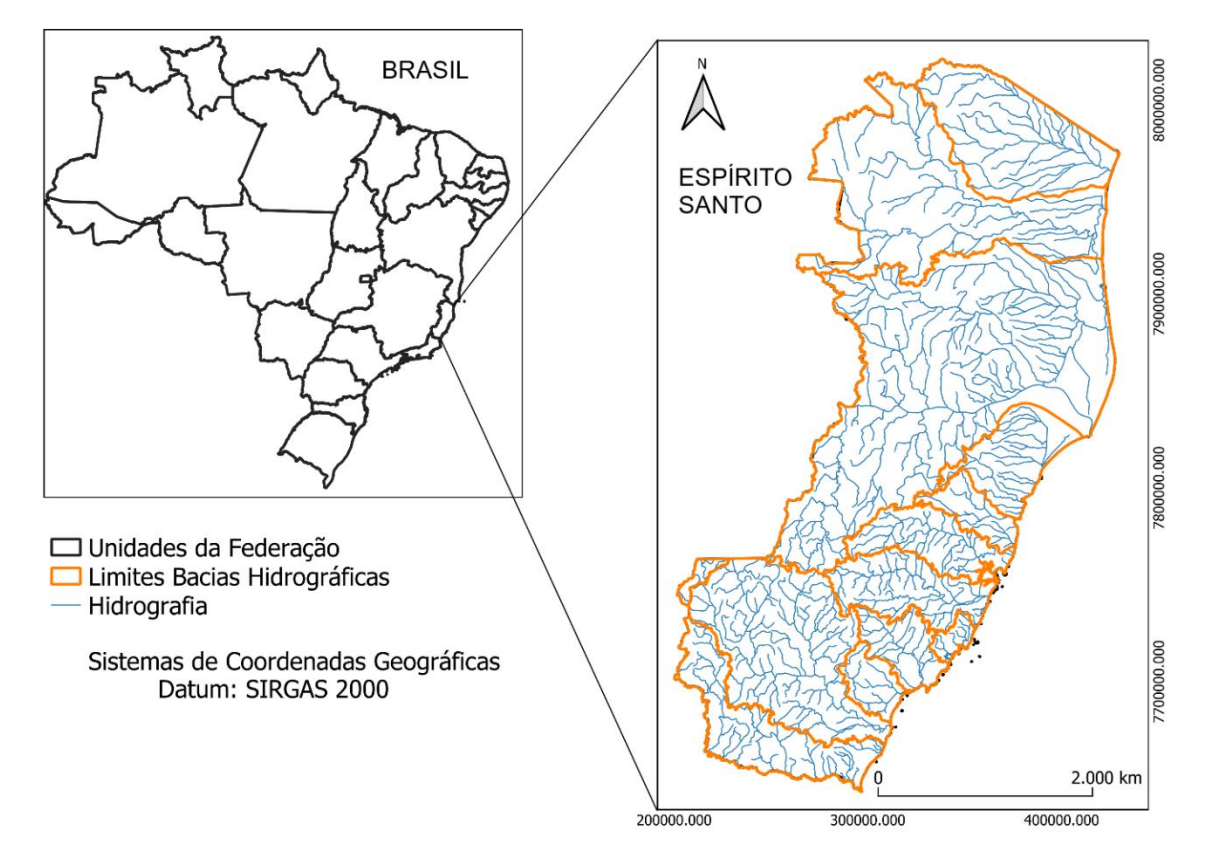
O clima predominante no estado é classificado como tropical úmido, caracterizado por temperaturas médias anuais em torno de 23 °C e pela ocorrência de uma estação chuvosa durante o verão. A

precipitação anual supera 1.400 mm, com distribuição mais intensa nos meses mais quentes do ano (Espírito Santo, 2024).

Conforme ilustrado na Figura 1, o Espírito Santo apresenta uma significativa rede hidrográfica, composta por diversas bacias e sub-bacias que desempenham papel crucial na disponibilidade de água e no desenvolvimento das atividades socioeconômicas. O estado conta com 14 comitês de bacias hidrográficas e órgãos colegiados responsáveis pela gestão dos recursos hídricos (AGERH, 2023).

Para o mapeamento das áreas suscetíveis a inundações no estado do Espírito Santo, foi empregada a técnica de análise multicritério por meio do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em ambiente de geoprocessamento, utilizando-se a álgebra de mapas. Foram executados diversos procedimentos metodológicos, descritos a seguir, relacionados à construção de hierarquias e à elaboração da base de dados.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: ANA, 2019, IBGE 2022. Elaboração: Os autores, 2024.

Construção de hierarquias

No método AHP, o problema é organizado em níveis hierárquicos para facilitar sua compreensão e avaliação. Os objetivos são dispostos no primeiro nível, os critérios no segundo e as alternativas no terceiro.

Definição de prioridades

O ajuste das prioridades no AHP fundamenta-se na capacidade do decisor de perceber o quanto cada elemento influencia os demais em níveis distintos (Sacramento, 2020). Diante disso, o decisor realiza comparações em pares entre os elementos da estrutura hierárquica (critérios, subcritérios e alternativas), atribuindo valores de importância conforme a escala proposta por Saaty (1991), variando de 1 a 9.

Consistência lógica

Conforme apontado por Costa (2002), um dos benefícios do AHP é a capacidade de avaliar a consistência do modelo de priorização desenvolvido. Essa avaliação é feita por meio da razão de consistência (RC), obtida pela divisão entre o índice de consistência (ICon) e o índice de consistência randômica (IR).

O valor de RC varia de 0 a 1, sendo 0 indicativo de total consistência e 1 de total inconsistência, conforme explicado por Moreira et al. (2001) e Sacramento (2020).

Uma das principais vantagens da aplicação da análise multicritério com o método AHP é a capacidade de integrar diferentes tipos de informações, como dados geográficos, socioeconômicos e ambientais, em uma única análise. Essa integração permite uma avaliação mais abrangente e holística das áreas de risco, considerando não apenas as características físicas do ambiente, mas também os aspectos sociais e econômicos.

O primeiro passo para a aplicação do método AHP na definição dos pesos atribuídos a cada critério relacionado à ocorrência de inundações consistiu em realizar uma comparação dois a dois, utilizando uma matriz de comparação pareada.

Nessa abordagem, os critérios foram organizados em uma matriz, na qual as linhas e colunas representam as variáveis a serem comparadas, e cada célula reflete a comparação entre dois critérios. A comparação foi realizada por meio da atribuição de valores numéricos que expressam o grau de importância ou dominância de um critério em relação a outro, no contexto do fenômeno estudado.

Esses valores foram definidos com base na escala de Saaty (1990), que varia de 1 a 9, sendo 1 indicativo de igual importância entre os critérios e valores mais altos representando dominância extrema de um critério sobre outro. Para as comparações inversas, o valor atribuído foi o inverso do grau de importância da comparação direta, garantindo a consistência matemática da matriz.

A diagonal principal da matriz, que representa o cruzamento de cada critério consigo mesmo, foi preenchida com o valor 1, indicando que um critério possui igual importância em relação a si próprio.

Na Tabela 1, apresenta-se o resultado da comparação pareada entre os critérios, com os valores de importância atribuídos a cada comparação.

Observa-se que o HAND foi considerado o critério de maior relevância frente aos demais, por estar diretamente associado à proximidade com drenagens e corpos hídricos, além de relacionar-se à saturação do solo e ao risco de inundações, o que o torna um dos indicadores mais representativos na avaliação de áreas propensas a esse fenômeno.

A declividade foi avaliada com grau de importância superior aos critérios de uso e cobertura da terra, precipitação e geomorfologia, principalmente por estar relacionada ao controle da velocidade e direção do escoamento superficial. Áreas com inclinação elevada favorecem o rápido escoamento, reduzindo, assim, a suscetibilidade à inundação.

Tabela 1 - Matriz de comparação pareada entre os critérios à inundação

	HAND	Declividade	Uso e Cobertura da Terra	Precipitação	Geomorfologia
HAND	1	4	3	4	4
Declividade	1/4	1	2	4	4
Uso e Cobertura da Terra	1/3	1/2	1	3	3
Precipitação	1/4	1/4	1/3	1	1/2
Geomorfologia	1/4	1/4	1/3	2	1

Fonte: Os autores, 2024.

A precipitação foi avaliada como mais importante que a geomorfologia e o uso e cobertura da terra, devido à sua associação direta com o volume de água que pode potencialmente ser acumulado ou

escoado na área de estudo, configurando-se como um fator desencadeante de eventos hidrológicos de inundação. Em regiões com altos índices pluviométricos, o risco de saturação do solo e de transbordamento das drenagens aumenta significativamente.

A geomorfologia foi considerada mais relevante que o critério de uso e cobertura da terra, uma vez que a topografia da região exerce grande influência sobre as condições naturais de escoamento e acumulação de água.

Por fim, o uso e cobertura da terra foi avaliado como o critério de menor relevância. No entanto, esse fator apresenta boa capacidade de refletir as condições de impermeabilização do solo, as quais influenciam o padrão de escoamento. Áreas urbanizadas, com maior impermeabilização, tendem a intensificar o volume e a velocidade do fluxo superficial, contribuindo para a ocorrência de enchentes.

Conforme a metodologia do AHP, após a comparação pareada dos critérios e o preenchimento da matriz, foi realizado o cálculo dos pesos de cada critério por meio da somatória dos valores obtidos nas comparações. Assim, procedeu-se à soma de cada uma das linhas, resultando na coluna D.

Em seguida, os valores foram normalizados mediante a divisão dos valores de cada critério pelo somatório da coluna, obtendo-se, assim, os pesos normalizados de cada critério, conforme demonstrado nas Equações 1 e 2.

$$D_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (1)$$

Em que: D_i corresponde ao somatório das linhas de cada critério; M corresponde aos valores de importância atribuídos nas linhas para cada um dos critérios

$$W_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (2)$$

Em que: W_i corresponde aos pesos de cada critérios calculados a partir da normalização dos valores de D_i para cada linha;

Na Tabela 2 é apresentado o peso resultado para cada um dos critérios.

Tabela 2 - Pesos dos critérios determinados pela AHP

	D	W	Pesos
HAND	16,0	16/41,3 = 0,39	39%
Declividade	11,3	11,3/41,3 = 0,27	27%
Precipitação	7,8	7,8/41,3 = 0,06	19%
Uso e Cobertura da Terra	2,3	2,3/41,3 = 0,19	6%
Geomorfologia	3,8	3,8/41,3 = 0,09	9%
Soma	41,3		

Fonte: Os autores, 2024.

Após o cálculo dos pesos, é necessário avaliar a consistência dos resultados, ou seja, verificar se os pesos obtidos pela comparação pareada são aceitáveis. Para isso, foi calculada a Razão de Consistência (RC), cujo valor de referência considerado aceitável é de até 0,1. Assim, caso o valor da RC seja superior a 0,1, torna-se necessário revisar o modelo.

Para determinar a RC, primeiramente foram calculados os valores de A_w , que correspondem ao vetor da soma ponderada. Esse vetor foi obtido por meio do produto matricial entre cada linha da matriz de comparação pareada e a matriz W, conforme apresentado na Equação 3, resultando na matriz A_w exibida na Tabela 3.

$$A_{wi} = D \times W \quad (3)$$

Em que: A_{wi} corresponde vetor da soma ponderada de cada critérios;

Tabela 3 - Valores de A_w determinados pela AHP

	A_w
HAND	2,65
Declividade	1,35
Precipitação	0,90
Uso e Cobertura da Terra	0,33
Geomorfologia	0,43

Fonte: Os autores, 2024.

Na sequência, foi calculado o vetor λ a partir da divisão dos valores de W pelos autovalores correspondentes de A_w , conforme Equação 4, gerando os valores apresentado na Tabela 4.

$$\lambda_i = \frac{A_{wi}}{w_i} \quad (4)$$

Em que: λ_i corresponde ao vetor da soma ponderada dos critérios

Tabela 4 - Valores de λ determinados pela AHP

	λ
HAND	6,82
Declividade	4,94
Precipitação	4,76
Uso e Cobertura da Terra	5,86
Geomorfologia	4,68

Fonte: Os autores, 2024.

A partir dos valores de λ , foi calculado o autovetor (λ_{\max}) por meio da Equação 5, obtendo-se o valor de 5,41, conforme apresentado na Tabela 5.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_i \quad (5)$$

Em que: λ_{\max} corresponde ao vetor de consistência; n corresponde ao número de critérios utilizados na análise.

Dessa maneira, é possível calcular o índice de consistência (IC), aplicando o λ_{\max} na Equação 6, obtendo assim um IC de 0,10:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Na sequência, foi calculada a Razão de Consistência (RC). Para isso, foi necessário identificar o Índice Randômico (IR) correspondente à quantidade de critérios utilizados na análise a partir da Tabela 5 de índices, elaborada por Saaty (1991), para este caso de 1,12.

Tabela 5 - Índices aleatórios IR em matrizes para AHP

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

Fonte: Saaty (1990).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (7)$$

Em que: RC é a razão de consistência; IC é o índice de consistência; IR é o índice randômico.

Por fim, a partir da Equação 7, a RC determinada foi de 0,092. O resultado de RC inferior ao limiar de 0,10, indica que os pesos determinados estão consistentes e aceitáveis.

BASE DE DADOS PARA SUSCEPTIBILIDADE À INUNDAÇÃO

Declividade

Os dados de declividade do terreno foram gerados a partir do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Copernicus Global*, com resolução espacial de 90 m (GLO-MDE90). A partir desse processamento, foi produzido um raster contendo as informações de declividade em porcentagem para todo o estado.

Com base nas classes de declividade definidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1979), foram atribuídos graus de suscetibilidade à ocorrência de inundações, conforme apresentado na Tabela 6. Em seguida, procedeu-se à reclassificação do arquivo *raster* por meio da ferramenta *Reclass*.

Tabela 6 - Grau de susceptibilidade à inundação das classes de declividade

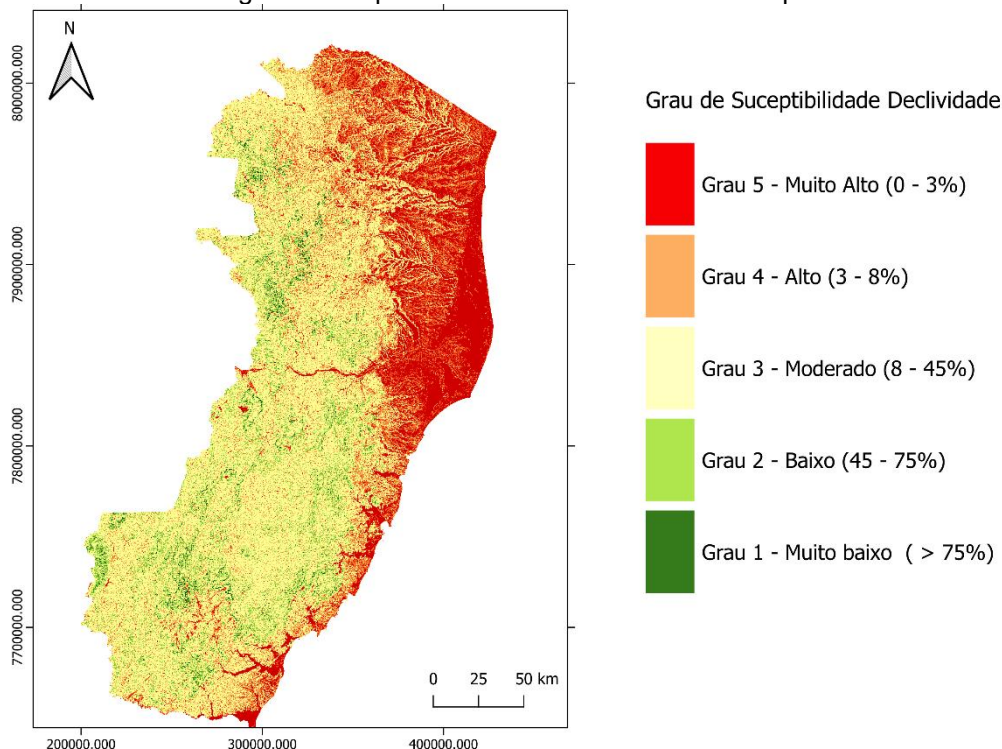
Declividade %	Grau	Reclassificação
> 75 % Escarpado	Muito baixo	1
45 – 75 % Montanhoso	Baixo	2
20 – 45 % Forte ondulado	Moderado	3
8 – 20% Ondulado	Moderado	3
3 – 8% Suave ondulado	Alto	4
0 – 3% Plano	Muito alto	5

Fonte: Embrapa, 1979. Elaboração: Os autores, 2024.

Em seguida, com o MDE, foi realizado o processamento para geração dos valores de declividade em porcentagem. Para elaboração do mapa temático, realizou-se a classificação dos valores de declividade (%), conforme as classes de referência estabelecidas pela Embrapa (1979), que classifica a declividade do terreno em seis classes, variando desde o plano (com declividade entre 0 e 3%) até o relevo escarpado (com declividade superior a 75%). Ao final, foi elaborado o mapa de declividade para o estado do Espírito Santo, conforme a Figura 2.

A escolha do MDE de 90 metros justifica-se pela necessidade de equilíbrio entre precisão, eficiência computacional e adequação ao objetivo do estudo. Para o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações em uma área extensa como o estado do Espírito Santo, esse modelo oferece precisão satisfatória sem demandar custos computacionais excessivos. Além disso, o modelo de 90 metros é amplamente acessível e adequado para análises em escala regional, possibilitando uma execução eficiente do estudo. Ressalta-se que o modelo é disponibilizado gratuitamente pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Figura 2 - Mapa de declividade do estado do Espírito Santo



Fonte: Embrapa, 1979. Elaboração: Os autores, 2024.

Geomorfologia

Os dados geomorfológicos da área de estudo foram obtidos a partir da plataforma GEOIEMA, desenvolvida pela Coordenação de Geomática, Inovação Tecnológica e Informações Ambientais (CGEO) do Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEMA) do Espírito Santo (IEMA, 2022).

Com base nessa base cartográfica, foi realizada a análise espacial da diversidade geomorfológica do estado, contemplando as unidades geomorfológicas presentes. Os dados foram baixados no formato vetorial (*shapefile*), e, a partir deles, construiu-se o mapa de geomorfologia, apresentado na Figura 3.

Posteriormente, foi conduzida a análise das unidades geomorfológicas, classificando cada uma delas de acordo com o seu nível de susceptibilidade a inundações — variando entre muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. A classificação considerou as características topográficas de cada unidade: áreas de maior elevação tendem a apresentar menor susceptibilidade, devido ao escoamento eficiente, enquanto regiões planas ou deprimidas, próximas a cursos d'água, lagos ou ao oceano, apresentam maior propensão a inundações.

A presença de influências marinhas ou fluviais também foi considerada na definição dos graus de susceptibilidade. Dessa forma, foram atribuídos valores correspondentes a cada classe, conforme a Tabela 7.

A integração entre as características naturais da superfície terrestre e os fatores externos que potencializam o risco de inundações possibilita uma análise detalhada da susceptibilidade das diferentes áreas do estado. Tal abordagem fundamenta a criação de estratégias mais eficientes de gestão e mitigação de riscos ambientais, tanto para o controle de inundações quanto para o planejamento de medidas preventivas.

Após a atribuição do grau de susceptibilidade na tabela de atributos do arquivo *shapefile*, foi realizada a sua conversão para o formato *raster* de maneira que as feições classificadas como grau muito baixo ficaram com valor de 1, grau baixo com valor de 2, grau moderado com valor de 3, grau alto com valor de 4 e grau muito alto com valor de 5, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Grau de susceptibilidade à inundação das unidades geomorfológicas

Unidade Geomorfológica	Grau	Reclassificação
Alinhamentos de Cristas da Paraíba do Sul	Muito baixo	1
Bloco Montanhoso Central	Muito baixo	1
Maciços do Caparaó	Baixo	2
Colinas e Maciços Costeiros	Baixo	2
Patamares Escalonados do Sul Capixaba	Baixo	2
Chãs Pré-Litorâneas	Moderado	3
Tabuleiros Costeiros	Moderado	3
Terraços Fluviais	Moderado	3
Terraços Marinhos	Moderado	3
Depressão do Médio Rio Doce	Alto	4
Depressão Escalonada dos Rios Pomba-Muriaé	Alto	4
Depressão Marginal	Alto	4
Planícies de Enxurrada	Muito alto	5
Planícies Fluviais	Muito alto	5
Planícies Fluviolacustres	Muito alto	5
Planícies Flúvio-marinhas	Muito alto	5
Planícies Flúvio-lagunares	Muito alto	5
Planícies Marinhas	Muito alto	5

Fonte: IEMA, 2022. Elaboração: Os autores, 2024.

Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*)

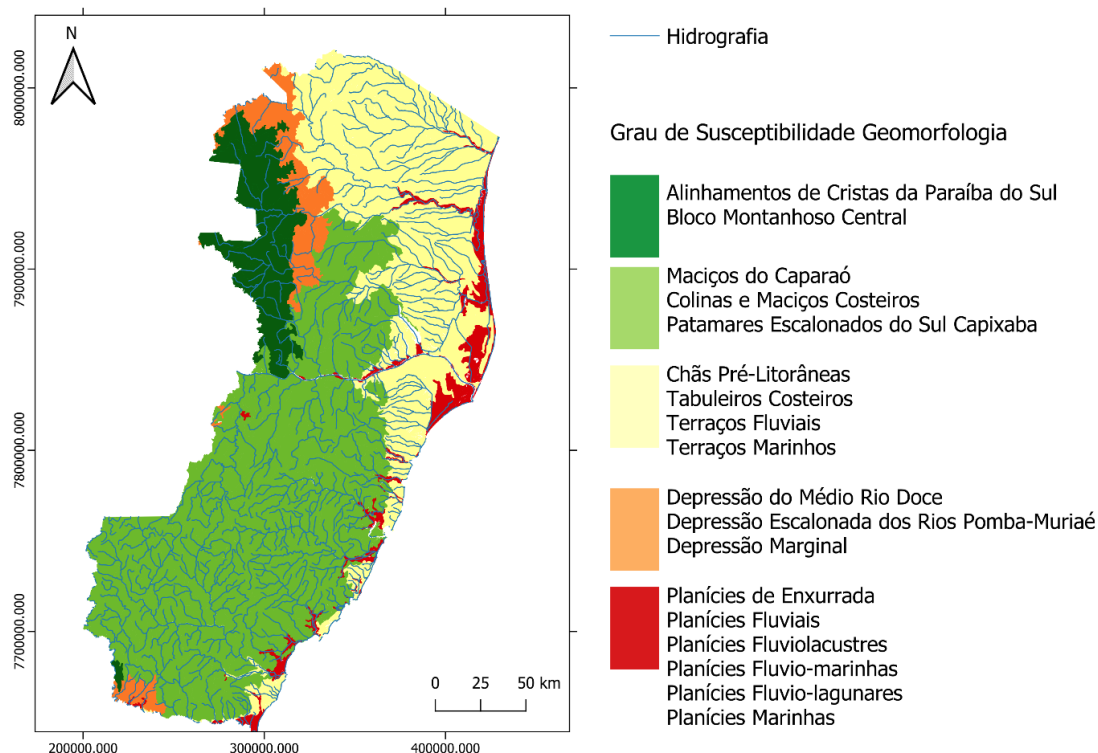
O modelo HAND para o estado do Espírito Santo foi gerado a partir do processamento do MDE do Copernicus Global com resolução espacial de 90 m (GLO-MDE90). O modelo foi obtido por meio do *plug-in* do QGIS integrado à plataforma OpenTopography, sendo recortado para a região de interesse.

Proposto por Nobre et al. (2011), o HAND representa a altura acima da drenagem mais próxima, calculada a partir da diferença entre a altitude extraída do MDE e a elevação da drenagem. Essa altura está relacionada à profundidade do lençol freático e à topografia local, de modo que áreas com menores diferenças de altura apresentam maior suscetibilidade a inundações.

O modelo é amplamente empregado em estudos hidrológicos e hidrostáticos, por representar de forma eficaz a cota de inundação de uma área em diferentes cenários de cheia.

Para geração do HAND, inicialmente foi preciso carregar o MDE no *software* HAND Model. Em seguida foi realizado o processamento do MDE com os seguintes procedimentos: Correção dos Vazios: O MDE pode apresentar áreas com dados ausentes ou incorretos, conhecidos como "vazios". Para garantir a integridade dos dados, foi realizada a correção desses vazios, por meio da interpolação ou substituição dos dados faltantes com base em valores adjacentes. Além disso, foi definido geração do fluxo acumulado: Esta etapa consistiu em calcular a direção e a intensidade do fluxo de água no terreno. A água segue uma trajetória definida pelas características da topografia, sendo o fluxo acumulado uma medida da quantidade de água que escoar por cada célula do modelo.

Figura 3 - Mapa da geomorfologia do estado do Espírito Santo



Fonte: Fonte: ANA, 2019, IEMA 2022. Elaboração: Os autores, 2024.

O fluxo acumulado é fundamental para definir os padrões de drenagem e a movimentação das águas. Ademais também foi realizada a geração das drenagens: Após calcular o fluxo acumulado, o modelo identificou as áreas de drenagem, que representam os cursos de água mais próximos e as regiões de maior propensão ao acúmulo de água.

As drenagens são importantes para a definição da altura do HAND, pois indicam as regiões onde a água é mais concentrada e onde o risco de inundação é maior. Por fim, foi gerado as Direções de Fluxo: A etapa final do pré-processamento envolveu a determinação das direções de fluxo, que indicam para onde a água fluiria a partir de cada célula do modelo. Isso é essencial para a definição de áreas mais propensas a alagamentos, uma vez que a água tende a se mover para os pontos mais baixos do terreno.

A correlação entre a altura do HAND e a profundidade do lençol freático também é relevante, pois locais com menor altura em relação à drenagem geralmente apresentam maior saturação do solo, o que pode afetar a dinâmica da água e a ocorrência de inundações. Além disso, o HAND é amplamente utilizado em modelos hidrostáticos para prever o comportamento de corpos d'água durante eventos de inundação, ajudando a definir a cota de inundação em diferentes cenários.

Em seguida, os dados *raster* foram reamostrados utilizando o método de quartil para cinco classes. A cada uma dessas classes foram atribuídos graus de susceptibilidade à ocorrência de inundações, de acordo com a análise proposta. Posteriormente, o arquivo *raster* foi reclassificado utilizando a ferramenta *reclass*, que permitiu reorganizar os valores das classes conforme os critérios estabelecidos para a análise em Tabela 8.

Tabela 8 - Grau de susceptibilidade a inundação das classes de HAND

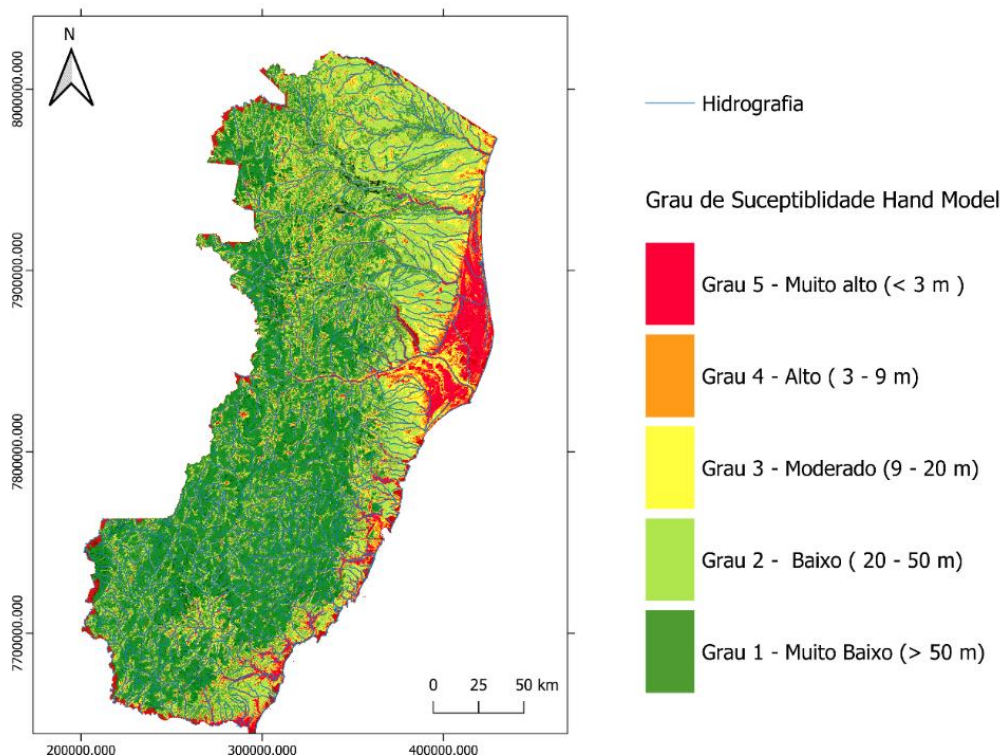
HAND	Grau	Reclassificação
50 – 100 m	Muito baixo	1
20 – 50 m	Baixo	2

9 – 20 m	Moderado	3
3 – 9 m	Alto	4
0 – 3 m	Muito alto	5

Fonte: NOBRE *et al.* (2011). Elaboração: Os autores, 2024.

A partir dos dados gerados nas etapas anteriores, o *software* HAND Model calculou a altura de cada ponto em relação à drenagem mais próxima, conforme Figura 4. O HAND representa a diferença de altitude entre o ponto em questão e o curso de água mais próximo, fornecendo uma medida precisa da altura acima da drenagem. Essa variável é de grande importância para a análise da suscetibilidade a inundações, pois regiões com menor diferença de altura tendem a ser mais vulneráveis a eventos de inundação.

Figura 4 - Mapa do HAND do estado do Espírito Santo



Fonte: Nobre *et al.* (2011), ANA, 2019. Elaboração: Os autores, 2024.

Precipitação

Os dados de precipitação para a área de estudo foram obtidos a partir do conjunto de precipitações diárias aprimoradas em grade (1961–2020), desenvolvido por Xavier *et al.* (2022), com resolução espacial de 100 metros.

A base de dados foi utilizada para calcular a precipitação média dos valores máximos diários anuais por ano hidrológico. Esses valores máximos foram espacializados por meio de técnica geoestatística de interpolação, utilizando o método do inverso do quadrado da distância (*Inverse Distance Weighting – IDW*).

Em seguida, o conjunto de dados de precipitação foi agrupado em cinco classes de intervalos iguais. A cada uma dessas classes foram atribuídos graus de susceptibilidade à ocorrência de inundações, conforme a análise proposta. Posteriormente, o arquivo raster foi reclassificado por meio da ferramenta *Reclass*, que possibilitou a reorganização dos valores das classes de acordo com os critérios estabelecidos para a análise (Tabela 9).

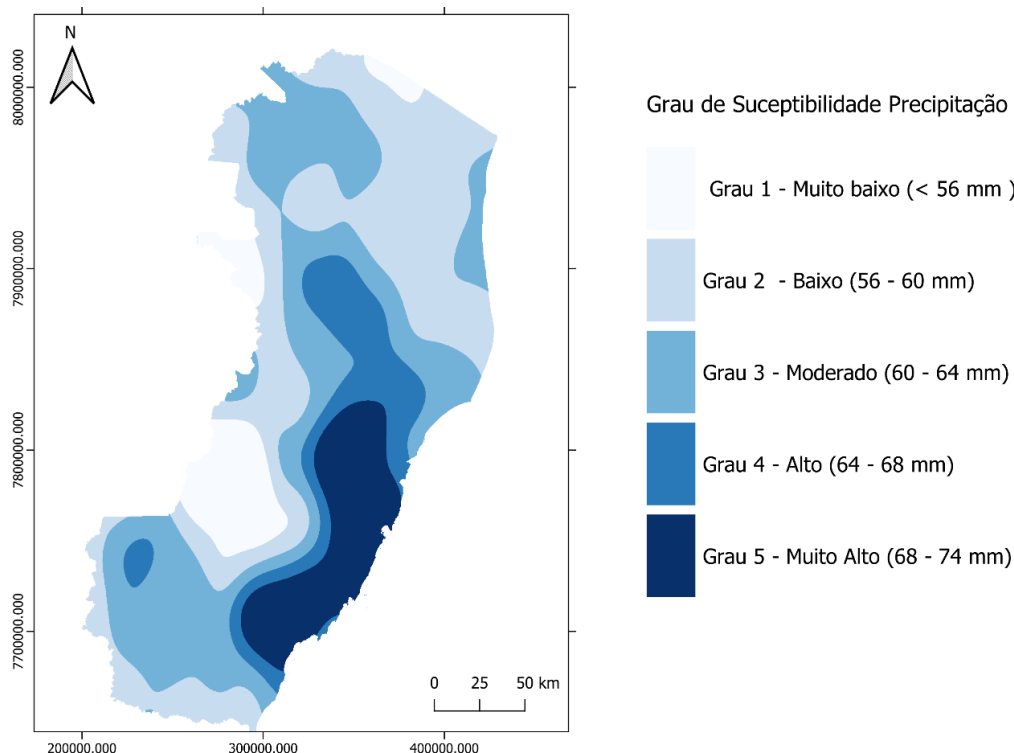
Tabela 9 - Grau de susceptibilidade a inundações das classes de precipitação

Precipitação (mm)	Grau	Reclassificação
48 - 56	Muito baixo	1
50 - 56	Baixo	2
56 - 62	Moderado	3
62 - 67	Alto	4
67 - 75	Muito alto	5

Fonte: Xavier *et al.* (2022). Elaboração: Os autores, 2024.

A partir do arquivo *raster* gerado pela interpolação dos dados, foi elaborado o mapa de precipitação (Figura 5).

Figura 5 - Mapa de precipitação do estado do Espírito Santo



Fonte: Xavier *et al.*, 2022. Elaboração: Os autores, 2024.

Uso e Cobertura da terra

Os dados de uso e cobertura da terra da área de estudo foram obtidos a partir da plataforma MapBiomas (2023), utilizando a Coleção 9, com resolução espacial de 30 metros.

O MapBiomas é uma iniciativa colaborativa que reúne instituições de pesquisa, especialistas e organizações para mapear e monitorar as mudanças no uso e cobertura da terra no Brasil, disponibilizando dados em alta resolução temporal e espacial.

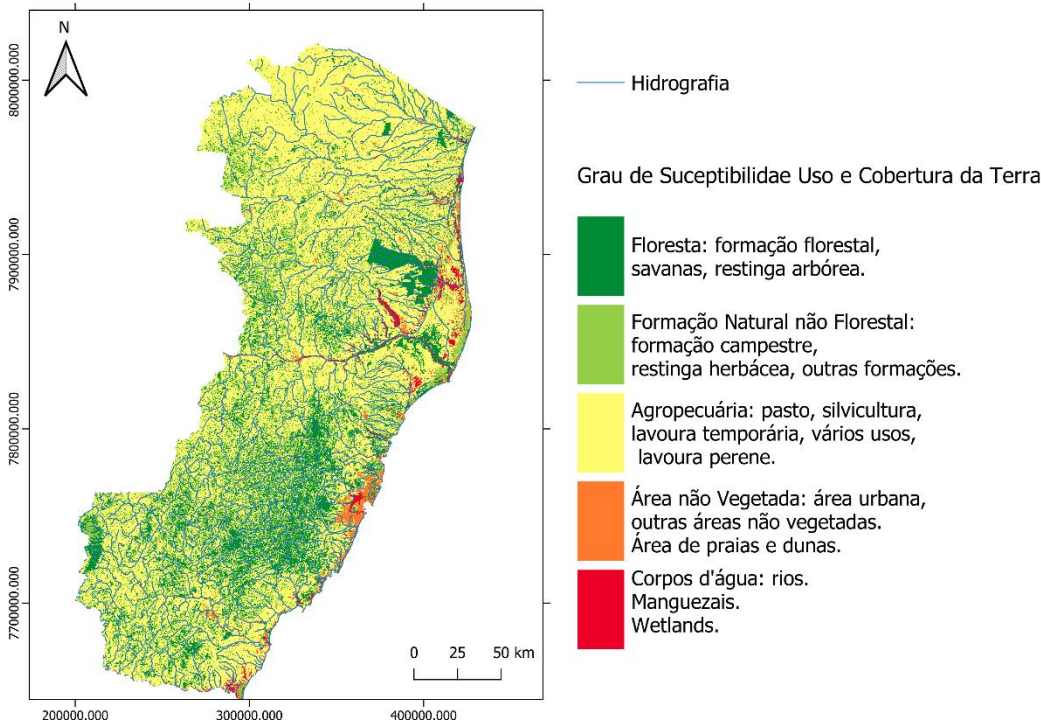
A partir da análise das classes de uso e cobertura da terra presentes no estado, foram atribuídos graus de suscetibilidade para cada classe. Em seguida, o raster de uso e ocupação foi reclassificado conforme a Tabela 10, e, a partir desse processamento, foi elaborado o mapa de uso e cobertura da terra, apresentado na Figura 6.

Tabela 10 - Grau de susceptibilidade à inundação das classes de Uso e Cobertura da terra

CLASSE	Grau	Reclassificação
Floresta: formação florestal, savanas, restinga arbórea.	Muito baixo	1
Formação Natural não Florestal: formação campestre, restinga herbácea, outras formações.	Baixo	2
Agropecuária: pasto, silvicultura, lavoura temporária, vários usos, lavoura perene.	Moderado	3
Área não Vegetada: área urbana, outras áreas não vegetadas.	Alto	4
Área de praias e dunas.		
Corpos d'água: rios.	Muito alto	5
Manguezais.	Muito alto	5
Wetlands.	Muito alto	5

Fonte: MapBiomass (2023). Elaboração: Os autores, 2024.

Figura 6 - Mapa de Uso e Cobertura da terra do estado do Espírito Santo



Fonte: MapBiomass, 2023, ANA, 2019. Elaboração: Os autores, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A elaboração do mapa de suscetibilidade à inundação foi realizada com base nos arquivos raster reclassificados dos critérios de geomorfologia, precipitação, declividade, HAND e uso e cobertura da terra. Após a reclassificação, procedeu-se à integração dos critérios por meio da álgebra de mapas, utilizando a ferramenta “Calculadora *Raster*” no QGIS.

Nesse processo, a álgebra ponderada foi aplicada para combinar os valores reclassificados de cada critério, ponderados pelos respectivos pesos definidos pelo método AHP. O resultado foi um arquivo raster único, representando o grau de suscetibilidade à inundação.

O raster resultante apresentou valores variando entre 0,97 e 4,85, correspondendo ao grau de suscetibilidade de cada pixel.

Para a construção do mapa final, os valores do raster foram classificados em intervalos definidos, conforme estabelecido na Tabela 11. A simbologia foi ajustada de modo a representar visualmente as classes de suscetibilidade, permitindo identificar com clareza as áreas de maior e menor vulnerabilidade à ocorrência de inundações.

Tabela 11 - Grau de susceptibilidade a inundação

Valor do <i>raster</i>	Grau
0 – 1,0	Muito baixo
1,0 – 2,0	Baixo
2,0 – 3,0	Moderado
3,0 – 4,0	Alto
4,0 – 5,0	Muito alto

Fonte: Os autores, 2024.

Ao analisar a hierarquia dos pesos, verificou-se que a elevação relativa em relação às drenagens (HAND) e a declividade apresentam o maior impacto na identificação das áreas mais suscetíveis. Isso ocorre porque terrenos planos e próximos a drenagens possuem maior propensão à acumulação de água durante eventos de chuva.

A precipitação, por sua vez, também se mostrou um critério relevante, corroborando as observações da Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo, que considera os episódios de chuvas intensas e os desastres hidrometeorológicos entre suas principais preocupações. Assim, quando a precipitação ultrapassa os limites esperados para determinada região, pode gerar cenários de risco elevado, comprometendo a infraestrutura, a segurança das populações e o equilíbrio dos ecossistemas.

Com base no mapeamento realizado para o estado (Figura 7), foi possível quantificar as áreas enquadradas em diferentes graus de suscetibilidade, proporcionando um embasamento mais sólido para as discussões — especialmente ao se considerar a extensão quantitativa das áreas mais críticas, conforme apresentado na Tabela 12.

Observa-se que o critério HAND, com 39% de peso, foi o mais influente na determinação da suscetibilidade, seguido pela declividade (27%), precipitação (19%), geomorfologia (9%) e uso e cobertura da terra (6%).

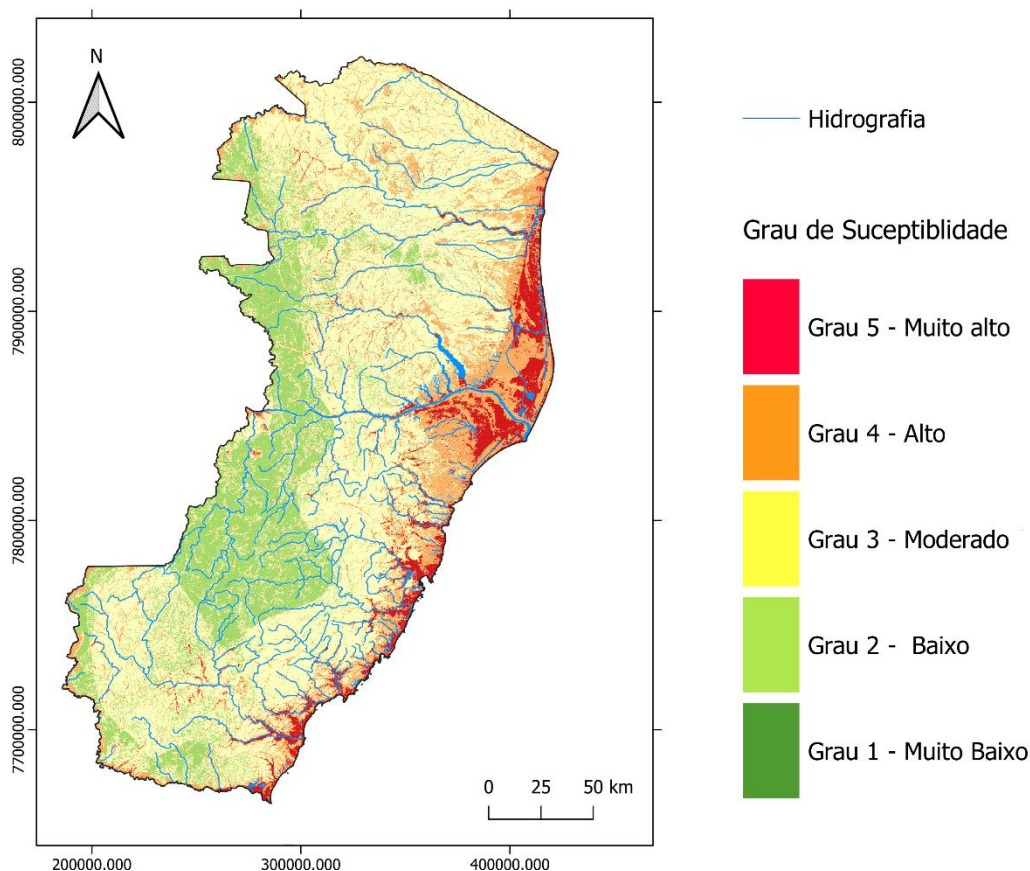
A análise dos mapas individuais dos critérios permite compreender como cada um deles contribui para os padrões observados no mapa final. O HAND destacou as áreas próximas aos cursos d'água como altamente suscetíveis, enquanto a declividade evidenciou que os terrenos planos apresentam maior tendência ao acúmulo de água.

Embora o uso e cobertura da terra tenha sido o critério com menor peso, ele mostrou-se igualmente relevante para identificar regiões urbanizadas e agrícolas mais suscetíveis, devido à interferência antrópica nas morfologias e nos processos naturais de drenagem.

Com base na integração dos mapas gerados e nos pesos atribuídos a cada critério segundo o método AHP, foi elaborado o mapa de suscetibilidade à inundação para o estado do Espírito Santo (Figura 7).

A partir da quantificação das áreas mapeadas, observou-se a distribuição dos diferentes graus de suscetibilidade à inundação. A Tabela 12 mostra que a maior parte da área do Espírito Santo é classificada como de suscetibilidade moderada, correspondendo a 24.563,5 km².

Figura 7 - Mapa de Susceptibilidade à Inundação do estado do Espírito Santo



Fonte: IEMA, 2022; Embrapa, 1979; Nobre *et al.* (2011); Xavier *et al.* (2022); MapBiomias (2023); ANA, 2019.
Elaboração: Os autores, 2024.

Em seguida, as classes de baixo e alto grau de suscetibilidade abrangem, respectivamente, 9.743,8 km² e 8.717,7 km² da área total. Já as áreas classificadas com grau muito alto representam 2.549,4 km², enquanto as de muito baixo grau são insignificantes, abrangendo apenas 2,7 km².

Tabela 12 - Grau de susceptibilidade à inundação do estado do Espírito Santo

Grau de susceptibilidade	Espírito Santo área (km ²)
Muito baixo	2,7
Baixo	9.743,8
Moderado	24.563,5
Alto	8.717,7
Muito alto	2.549,4

Fonte: Os autores, 2024.

O Livro Histórico de Desastres do Estado do Espírito Santo (2000–2009), publicado pela Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo (2010), aponta que as chuvas intensas

concentradas em curtos períodos são responsáveis por 73,4% dos casos registrados de deslizamentos de terra e inundações. A situação é agravada pela drenagem deficiente em áreas baixas, especialmente durante eventos climáticos extremos enfrentados pelo estado, o que aumenta consideravelmente o risco de inundações (Marengo et al., 2018).

Conforme destacado por Szymanski et al. (2022), estudos realizados em bacias hidrográficas de geomorfologia montanhosa no sul do Brasil indicam que, em áreas com relevo declivoso e presença de leques aluviais, o escoamento superficial ocorre de forma mais rápida, reduzindo o tempo de concentração da água e minimizando a ocorrência de alagamentos prolongados. Em contraste, terrenos planos próximos a corpos d'água são mais suscetíveis a inundações e exigem ações integradas de mitigação para reduzir os riscos desses eventos.

Observa-se que as áreas de maior suscetibilidade estão predominantemente localizadas próximas aos principais cursos d'água e nas zonas costeiras, refletindo a influência de fatores topográficos, hidrológicos (HAND) e do uso intensivo do solo.

Assim, o mapa consolidado de suscetibilidade valida não apenas os padrões observados nos mapas individuais, mas também reforça como a combinação entre os critérios contribui para a identificação das áreas de risco. Essa ferramenta se mostra essencial para o planejamento territorial e para a implementação de estratégias de mitigação de desastres naturais, especialmente em zonas costeiras e áreas urbanizadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a importância do uso de geoprocessamento e análise multicritério para a identificação e mapeamento das áreas mais suscetíveis a inundações no estado do Espírito Santo. A aplicação do modelo HAND, integrada aos dados de declividade, precipitação, uso do solo e características geomorfológicas, possibilitou a criação de um mapeamento detalhado das áreas vulneráveis, que pode servir como base para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação a desastres ambientais.

A distribuição das áreas de risco revelou que a maior parte do território estadual apresenta graus de suscetibilidade moderado a muito alto, com destaque para as zonas costeiras e planícies fluviais, que são mais propensas a inundações em função da topografia e da proximidade com cursos d'água. Em termos quantitativos, o grau moderado de suscetibilidade foi o mais predominante, abrangendo 24.563,5 km², seguido pelas áreas de suscetibilidade alta e muito alta, que também apresentam considerável extensão territorial.

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de um planejamento territorial mais eficiente, com investimentos em infraestrutura de drenagem e em ordenamento urbano sustentável, visando reduzir os riscos ambientais. A utilização contínua de tecnologias de geoprocessamento, associada à análise multicritério, mostra-se essencial para o aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos e para a prevenção de desastres ambientais no futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Massas d'água**. 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>. Acesso em: 5 dez 2024.

AGERH - Agência Estadual de Recursos Hídricos. 2023. Disponível em: <https://agerh.es.gov.br/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL DO ESPÍRITO SANTO.

Histórico de desastres do Estado do Espírito Santo 2000-2009, p. 1–112, 2010. Disponível em: <https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Publicacoes/Livro%20%20Hist%C3%B3rico%20de%20Desastres%20do%20Estado%20do%20Esp%C3%ADrito%20Santo%20%202000%20a%202009.pdf>.

Acesso em: 5 dez. 2024.

CORSEUIL, Cláudia Weber **Técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras**. 2006. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/101716>. Acesso em: 2 jan. 2025.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10. reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979, 83p.

ESPIRÍTO SANTO. **Geografia**. Disponível em: <https://www.es.gov.br/geografia>. Acesso em: 1 fev. 2024.

FURLAN, André Ricardo; TRENTIN, Romário. Urbanização e exposição ao perigo de inundação: um estudo na bacia hidrográfica do rio Henrique, Erechim, RS. **Revista Acta Geográfica**, v. 15, n. 37, p. 246-270, abr. 2021. <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v15i37.5896>

GARCIA, Bruno de Souza; DOURADO, Camila da Silva; DE AVILA, Ana Maria Heuminski. Physiographic analysis of the Atibaia River Basin and flood susceptibility mapping in the municipality of Campinas-SP, Brazil. **Revista Ambiente e Água**, v. 17, n. 3, 25 maio 2022. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2832>.

GHARARI, Shervan *et al.* Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND-based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 11, p. 3275-3291, 2011. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas territoriais do Brasil – 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>. Acesso em: 5 mar. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama Censo 2022**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

IEMA - Instituto Estadual de Meio Ambiente. **Limites territoriais do Brasil**. 2012. Disponível em: <https://geobases.es.gov.br/links-para-mapas1215>. Acesso em: dez.de 2024.

IEMA - Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **GEOIEMA**: plataforma de dados ambientais geoespaciais. 2022. Disponível em: <http://geo.iema.es.gov.br/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

LEAL, Fernanda Cláudia Barboza da Silva; BARBOSA, Ioná Maria Beltrão Rameh; AQUINO, Joás Tomaz de. Mapeamento de áreas vulneráveis à inundação com uso do SIG e da análise multicritério: o caso da bacia hidrográfica do rio Una em Pernambuco. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 01, p. 20, 2020. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e01202020-40>.

LOUREIRO, Renata Silva de. *et al.* Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. spe, p. 83–94, 2014. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130054>.

MAPBIOMAS. **Classes de uso e Cobertura da Terra**: Coleção 9. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

MARENGO, Jose A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**. Frontiers Media S.A. 2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>.

MOREIRA, Fábio Roque *et al.* Inferência Geográfica e Suporte à Decisão. In: CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

NOBRE, Antonio Donato *et al.* Aspectos físicos e geográficos das áreas ripárias no Brasil: análise preliminar da legislação. In: Ciência para o Código Florestal. São José dos Campos: Centro de Ciência para o Sistema Terrestre – INPE, 110 p. **Relatório Científico**. 2011. Disponível em: https://handmodel.ccst.inpe.br/?page_id=114. Acesso em: 5 mar. 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Desktop 3.28.9**. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 5 mar. 2024.

- SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- SAATY, Thomas L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 5 set. 1990.
- SAATY, Thomas L. **The Analytic Hierarchy Process**: planning, priority setting, resource allocation. Tradução e revisão por Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 278 p. 1991.
- SAATY, Thomas L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19–43, dez. 1994. <https://doi.org/10.13128/Aestimum-7138>.
- SACRAMENTO, Bruna Henrique. **Proposta metodológica de conectividade florestal e análise de gases de efeito estufa em bacias hidrográficas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, 2020.
- XAVIER, Alexandre C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 30 dez. 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

Recebido em: 22/05/2025

Aceito para publicação em: 19/09/2025