



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



## Identificação de áreas com risco de inundação na bacia hidrográfica do Rio Cachoeira no sul da Bahia

Pedro Rocha Farias<sup>1</sup>, Andrea Sousa Fontes<sup>2</sup>, Janaína Maria Oliveira de Assis<sup>3</sup>, Naiah Caroline Rodrigues de Souza<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Mestrando do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Águas e Saneamento - MAASA/UFBA, Salvador, Bahia. Email: pedrofarias@ufba.br;

<sup>2</sup> Professora do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Águas e Saneamento - MAASA/UFBA, Salvador, Bahia. Email: asfontes@ufba.br;

<sup>3</sup> Posdoc do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Águas e Saneamento - MAASA/UFBA, Salvador, Bahia. Email: janainaa@ufba.br;

<sup>4</sup> Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente – PPGENAM/UFBA, Salvador, Bahia. Email: naiahncrs@ufba.br.

Artigo recebido em 01/11/2023 e aceito em 26/05/2014

### RESUMO

Os desastres hidrológicos tornaram-se um dos problemas graves enfrentados no Brasil, principalmente nos ambientes urbanos devido ao fenômeno da urbanização que se desenvolveu desordenadamente e de maneira excludente, alterando a cobertura do solo significativamente e levando uma parcela da população a ocupar áreas de várzea. As medidas não estruturais diante desse contexto, surgem como forma de atenuar a ocorrência desses desastres devido ao seu caráter preventivo. Sendo assim, o presente estudo tem o objetivo de identificar as áreas com risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC), localizada no sul da Bahia, por meio de um mapa de risco de inundação, desenvolvido em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para isso foram sobrepostos os mapas temáticos de suscetibilidade a inundação, frequência de precipitações extremas e vulnerabilidade social, que foram processados pelo software de geoprocessamento QGIS (3.28). Os resultados que apontaram para 38,73% da área total da bacia, possui risco alto de inundação, e 0,16% risco muito alto, estando mais concentrados a jusante, onde se encontram os municípios de Itabuna e Ilhéus. Essas áreas são caracterizadas pela combinação de vários fatores, porém principalmente devido às baixas declividades, intensa urbanização, proximidade aos cursos d'água, intensidade pluviométrica e a vulnerabilidade social. Palavra-chave: Inundação, Risco, Precipitação Extrema, Geoprocessamento.

## Identification of critical areas with risk of flooding in the hydrographic reservoir of Rio Cachoeira on the Bahia

### ABSTRACT

Hydrological disasters have become one of the serious problems faced in Brazil, especially in urban environments, due to uncontrolled and exclusionary urbanization, significantly altering land cover and leading a portion of the population to occupy floodplain areas. Non-structural measures in this context emerge as a way to mitigate the occurrence of these disasters due to their preventive nature. Thus, the present study aims to identify flood-prone areas in the Cachoeira River Watershed (BHRC), located in the south of Bahia, through a flood risk map developed in a Geographic Information System (GIS) environment. To achieve this, thematic maps of flood susceptibility, extreme precipitation frequency, and social vulnerability were overlaid, and processed using the QGIS (3.28) geoprocessing software. The results indicate that 38.73% of the total area of the watershed has a high risk of flooding, and 0.16% has a very high risk, with the highest concentration downstream, where the municipalities of Itabuna and Ilhéus are located. These areas are characterized by a combination of various factors, but mainly due to low slopes, intense urbanization, proximity to watercourses, high rainfall intensity, and social vulnerability.

Keywords: Flood, Risk, Extreme Precipitation, Geoprocessing

### Introdução

As inundações, que estão ocorrendo de forma cada vez mais frequente, provocam notáveis catástrofes sociais e ambientais, sendo os desastres naturais mais comuns em todo o mundo (EM-DAT, 2024; Santos *et al.*, 2020; Hora & Gomes, 2009). Esses desastres podem resultar em perdas

significativas de vidas humanas, danos materiais e degradação de áreas urbanas e/ou rurais (Santos *et al.*, 2020).

A magnitude e recorrência das inundações é condicionada por diversos fatores como, características do terreno, intensidade das precipitações, mudanças climáticas e as condições

socioeconômicas da população atingida. Os impactos decorrentes dessas ocorrências abrangem prejuízos à biodiversidade, comprometimento das redes de água e saneamento, interrupção na coleta e disposição de resíduos sólidos, proliferação de vetores, além de assoreamento dos cursos naturais, potencializando a suscetibilidade a inundações das áreas impactadas (Ministério das Cidades, 2007). No que se refere aos impactos socioeconômicos, podem ser destacados os danos à infraestrutura, traumas físicos e psicológicos e óbitos (Organização Pan-Americana da Saúde, 2015).

De acordo com o EM-DAT (GUHA-SAPIR ET AL., 2018), entre 1964 a 2017, foram registradas no Brasil 7.784 mortes decorrentes de inundações, afetando 20,2 milhões de pessoas e resultando em danos estimados em 9,4 bilhões de dólares.

Essa realidade se relaciona principalmente com o processo desordenado de expansão da urbanização que acontece no Brasil. Tal realidade impacta nas alterações de uso e ocupação da terra, impermeabilização do solo, poluição de corpos hídricos, redução de áreas verdes e aumento do escoamento superficial (Fonseca Neto *et al.*, 2020; Bega; Ribeiro; Lima, 2019). O modelo de urbanização vigente, associado à redução das áreas verdes e avanço das áreas de pastagens e exploração agrícola com formas de manejo que não favorecem o equilíbrio dos biomas, acabam por promover diferenças de condições de vulnerabilidade e risco ambiental e social (Marengo *et al.*, 2023; Pisani, 2019). As áreas consideradas de risco passam a ser assim chamadas devido à maior probabilidade e exposição a ocorrências dos desastres socionaturais.

É evidente, que problemas se apresentam quando a precipitação ocorre em situações extremas de intensidade, duração e frequência, sendo fundamental dispor de informações que não só forneçam suporte ao estabelecimento de diretrizes na ocorrência de chuvas intensas, mas também que subsidie futuros planos de gestão municipais e das bacias hidrográficas, considerando ainda qual é a resposta no espaço às referidas precipitações. Nesse contexto, o mapeamento digital é uma ferramenta fundamental para identificar e caracterizar áreas de risco, apoiando o planejamento ambiental e urbano, bem como medidas não estruturais de redução de danos causados por desastres. Mapas digitais permitem análises por meio da integração, compilação e ponderação de diferentes informações geográficas, contribuindo para identificar áreas vulneráveis a enchentes e inundações (De Lima e De Souza, 2023; Lopes *et al.*, 2019). Além disso, o

mapeamento através do uso de geoprocessamento e ferramentas Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é economicamente viável e simples de ser realizada (Waqas *et al.*, 2021; Goerl, 2012).

Destaca-se o papel das ferramentas SIG na integração de estimativas sociais e biofísicas para a produção de mapas de perigo, vulnerabilidade e risco. Tais ferramentas orientam o planejamento de ações de emergência e contingência, o monitoramento de desastres, a implementação de sistemas de alerta e a realização de inventários e avaliações de danos causados por eventos extremos (Lopes *et al.*, 2019; Correia *et al.*, 2015).

A Lei 12.608, de 10 de abril de 2012, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), legitima o monitoramento e gerenciamento de áreas de riscos. Ela cria o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) para coordenar ações relacionadas a desastres e direciona como unidade de análise de desastre a bacia hidrográfica, além de determinar que sejam realizados a identificação, mapeamento e estudos de áreas vulneráveis a desastres naturais (BRASIL, 2012 para viabilizar a elaboração de planos de gerenciamento de risco).

De acordo com Kelman (2024), ampliar a perspectiva para abranger toda a bacia hidrográfica é crucial, conforme evidenciado pelas recentes enchentes no Rio Grande do Sul. Não é mais viável abordar desastres dessa magnitude sem considerar a interconexão dos territórios, apenas a nível municipal. É imperativo adotar uma visão mais ampla e integrada, considerando as interações complexas entre diferentes regiões e a variabilidade dos fluxos hídricos.

Estudos, como os de Portela *et al.* (2023) e Crispim (2023) vêm sendo desenvolvidos com a aplicação de técnicas de geoprocessamento, com o objetivo de mapear e analisar tanto áreas suscetíveis quanto áreas de risco a inundações, em escala de bacia hidrográfica, contribuindo para a gestão e prevenção de desastres.

No que se refere ao mapeamento de suscetibilidade, Waqas *et al.* (2021), utilizaram o geoprocessamento associado ao método AHP, considerando como variáveis de análise o tamanho do rio, densidade de drenagem, declive, elevação, pluviosidade, uso do solo, tipos de solo e geologia para realizar o zoneamento da suscetibilidade à inundações no distrito de Chitral Khyber Pakhtunkhwa, no Paquistão. Barbosa *et al.* (2022) realizaram o mapeamento das áreas suscetíveis às inundações e aos alagamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, em Pernambuco, utilizando metodologia parecida, contudo, considerando apenas as variáveis uso e ocupação

do solo, hipsometria, declividade e pedologia para análise da suscetibilidade. Os dois estudos citados incorporaram uma grande gama de parâmetros, destacando-se o parâmetro climático de distribuição de precipitação acumulada anual. Contudo, tal parâmetro seria mais representativo caso considerasse a distribuição de intensidade de precipitação na área, fator este preponderante na deflagração do evento hidrológico como apontado de forma análoga em outros trabalhos que buscaram relacionar as chuvas intensas e o acumulado de chuva com eventos de inundações (Crispim, 2023; Neto *et al.*, 2022; Choo *et al.*, 2019; Norbiauto *et al.*, 2008). O estudo de Campioli e Vieira (2019), desenvolveu um mapa de risco de inundação na bacia do rio Cubatão do Norte, em Santa Catarina, somando pesos do mapa de suscetibilidade e vulnerabilidade social da região. Os pesos foram atribuídos de acordo com o macrozoneamento do município, as regiões inseridas em zoneamentos com infraestrutura precária receberam pesos mais altos. Nota-se, entretanto, que essa proposta se mostra aplicável a nível de microbacia, porém, a nível de macrobacia, se torna difícil aplicação devido ao detalhamento de informações necessárias.

Silva *et al.* (2022) elaboraram um mapa de risco de inundações na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, que possui 471,330km<sup>2</sup> e apresenta relevante importância para a região metropolitana da cidade de Recife com o uso de uma metodologia similar à de Campioli e Vieira (2019). Os estudos realizados por Mendes *et al.* (2020) e por Rezende *et al.* (2017) também constroem mapas de risco de inundação à nível de microbacias e Portela *et al.* (2023) de macrobacias urbanas, porém não são incorporados nos mapas fatores relacionados à exposição socioeconômica, apenas na discussão dos resultados. Fica evidente, a relevância da aplicação de uma metodologia que se adeque a bacias maiores, que vêm experienciando eventos extremos de precipitação amplamente registrados e noticiados principalmente aquelas que abrangem regiões de importância regional, como é o exemplo da Bacia Hidrográfica do rio Cachoeira.

Na região da Bacia Hidrográfica do rio Cachoeira (BHRC), nos anos de 2021, 2022 e 2023, ocorreram eventos extremos de precipitação amplamente registrados e noticiados. Entre os dias 23 e 27 de dezembro de 2021, o Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) registrou 209 mm de chuva na cidade de Ilhéus, inserida na BHRC, sendo que a média para o mês de dezembro é de 122.8mm (Marengo *et al.*, 2023). De acordo com o portal Agência Brasil, esse evento culminou na inundação de um bairro da zona rural do

município que é margeado pelo rio Almada (Brandão, 2021). Tal contexto evidencia a necessidade da aplicação de uma metodologia que analise a suscetibilidade associada às aspectos físico-ambientais existentes na bacia do Cachoeira através do geoprocessamento para a identificação e diagnóstico das áreas de maior risco, uma vez que essa abordagem possibilita a melhor visualização das características físicas, ambientais e sociais que interferem na dinâmica de inundação da bacia hidrográfica. Além disso, destaca-se ainda a relevância de serem considerados também os aspectos socioeconômicos da população por serem fatores intensificadores da vulnerabilidade à ela imposta (Moreira e Kobayama, 2021).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo identificar as áreas críticas com risco de inundação na bacia hidrográfica do Rio Cachoeira por meio da integração dos mapas temáticos de suscetibilidade a inundação, precipitações extremas e vulnerabilidade social, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Assim, por meio da análise desenvolvida, é ampliado a possibilidade de identificação de áreas propícias à implementação de medidas preventivas e mitigadoras de inundações como, sistemas de previsão e alerta e ordenamento do uso e cobertura do solo de maneira mais eficaz e construção de estruturas hidráulicas.

## Área de estudo (2)

A bacia hidrográfica do rio Cachoeira (BHRC) está localizada no sul do estado da Bahia, Brasil (Figura 1). A bacia possui uma área de aproximadamente 4.300 km<sup>2</sup>, contemplando 13 municípios, com aproximadamente 600.000 habitantes (Secretaria do Meio Ambiente, 2017; IBGE, 2023).

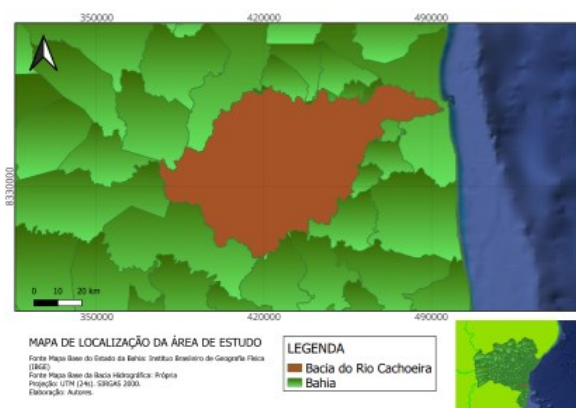


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

A topografia com elevação gradativa sentido litoral - interior, forma uma barreira orográfica, condicionando o surgimento de

diferentes zonas climáticas e acumulados de precipitação (Nacif et al., 2000; Braga et al., 1998).

De acordo com a classificação climática de Köppen (1936), a Bacia Hidrográfica do rio Cachoeira abrange três distintos domínios climáticos em uma orientação leste-oeste. Ao leste, encontra-se o clima tropical chuvoso de floresta sem estação seca (Af); na região central, predomina o clima tropical de monções (Am); e na porção oeste, verifica-se o clima tropical sub úmido, caracterizado por chuvas no verão e períodos de seca no inverno (Aw) (ENGELBRECHT et al., 2019).

A BHRC pode ser dividida em três zonas distintas em termos de uso e cobertura do solo: a metade a montante, a metade a jusante e a desembocadura. Na zona de metade a montante da bacia, que abrange a porção centro-oeste, a vegetação é predominantemente composta por gramíneas destinadas à pastagem, com algumas áreas pequenas de mata identificáveis. Devido à atividade pecuária, a cobertura vegetal nesta zona encontra-se bastante reduzida. Na área de metade a jusante, situada na região centro-leste, a terra é essencialmente utilizada para o cultivo de cacau, o que resulta na formação de florestas em diferentes estágios de regeneração, além de pequenas áreas de pastagem. Por fim, a zona de desembocadura da bacia, localizada na região de Ilhéus, é dominada por áreas de mangues e restinga (Secretaria do Meio Ambiente, 2017).

## Material e métodos

Para a identificar as áreas (críticas com risco de inundação) expostas a danos (humanos e materiais) em decorrência das inundações na BHRC, foi construído um mapa de risco de inundação, desenvolvido com base na integração de diferentes critérios definidos na literatura (Barbosa et al., 2021; Campioli et al., 2019; Ferreira Filho, 2022; Mendes et al., 2020; Rezende et al., 2018 e Santos, 2016).

A metodologia definida propõe pela sobreposição em ambiente SIG dos mapas temáticos de suscetibilidade a inundação, precipitações extremas e vulnerabilidade social da área de estudo, a obtenção de um mapa síntese de risco de inundação.

Os mapas foram elaborados e manipulados pelo *software* de geoprocessamento QGis (versão 2.28), em formato de arquivo matricial (*raster*) com resolução espacial de 12,5m, coordenadas UTM zona 24S e no Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000.

**Mapa de suscetibilidade (3.1):** O método aplicado para criar o mapa de suscetibilidade a inundação na BHRC foi fundamentado nos princípios do Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Thomas Saaty em 1977 e utilizado em inúmeros trabalhos de mapeamento de risco de inundação como em Barbosa et al. (2021), Campioli et al. (2019), Golveia et al. (2021), Rezende et al. (2017) e Santos e Ventorini (2017).

O método de Saaty (1977) estabelece uma escala de importância por meio da atribuição de pesos às diferentes classes dos parâmetros escolhidos. Cada uma desses parâmetros desempenha um papel específico na determinação da suscetibilidade à inundação da área sob análise.

Na primeira etapa do método AHP, foi atribuído pesos de 1 a 5 às classes dos parâmetros, proporcionais ao seu grau de suscetibilidade. Isso significa que áreas altamente suscetíveis receberam pesos próximos a 5, enquanto áreas menos suscetíveis foram atribuídas com pesos próximos a 1.

Os parâmetros definidos, com base na literatura consultada, incluem: hipsometria, declividade, uso e cobertura solo, áreas urbanas, pedologia e proximidade aos cursos d'água.

**Hipsometria:** Esse parâmetro exerce um impacto significativo na suscetibilidade de inundação, especialmente devido a acumulação de água em regiões de menor altitude (Magalhães et al., 2011). A partir do modelo digital de terreno (MDT) do satélite "Alos Palsar", obtido pelo site *University of Alaska System*, com resolução espacial de 12,5 metros (Alaska, 2015), foi gerado o mapa hipsométrico, com amplitude altimétrica de 0 a 1400 metros. A hipsometria foi reclassificada, pelo algoritmo *r.reclass*, com intervalos de altitude. Em seguida reclassificou-se os intervalos de altitude, atribuindo-lhes pesos referentes a suscetibilidade para a inundação, em concordância a hipsometria da bacia, como apresentado na Tabela 1, onde "h" significa altitude.

**Tabela 1.** Pesos atribuídos para as classes de altitude.

| Altitude (m)       | Peso |
|--------------------|------|
| $400 < h$          | 1    |
| $300 < h \leq 400$ | 2    |
| $200 < h \leq 300$ | 3    |
| $100 < h \leq 200$ | 4    |
| $0 < h \leq 100$   | 5    |

**Declividade:** A variável declividade é uma condicionante que influencia no acúmulo de água no terreno. Em regiões de alta declividade se tem um maior escoamento superficial, atenuando a tendência de acúmulo de água, já os terrenos planos, apresentam maior tendência de acúmulo de água (Magalhães, 2011; Oliveira & Vieira, 2017; Prochmann, 2014). O mapa de declividade foi gerado através do algoritmo *r.slope*, com as declividades sendo expressas em porcentagem. Posteriormente as declividades foram reclassificadas em intervalos associados às características do relevo, conforme classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 2006). Em áreas planas com até 3 % de declividade foi adotado o maior grau de suscetibilidade (peso), para maiores declividades atribuiu-se pesos mais baixos, conforme apresentado na Tabela 2, onde “d” significa declividade.

**Tabela 2.** Pesos atribuídos para as classes de declividade.

| Declividade (%)  | Classe de Declividade  | Peso |
|------------------|------------------------|------|
| $45 < d$         | Montanhoso e Escarpado | 1    |
| $20 < d \leq 45$ | Forte Ondulado         | 2    |
| $8 < d \leq 20$  | Ondulado               | 3    |
| $3 < d \leq 8$   | Suave Ondulado         | 4    |
| $0 < d \leq 3$   | Plano                  | 5    |

A Figura 3 apresenta o mapa de declividade desenvolvido.

**Uso e Cobertura do Solo:** A variável retrata a cobertura do solo. As áreas mais impermeabilizadas tendem a escoar um maior volume de água superficialmente, devido a menor infiltração de água, em contraposição às áreas menos impermeabilizadas (Magalhães et al., 2011). O mapa de uso e cobertura do solo utilizado no estudo foi obtido através da plataforma digital MapBiomas, Coleção 7 (MapBiomas, 2021), em formato *raster*, sendo posteriormente manipulado para a projeção e resolução espacial utilizada no estudo. Desse modo foi atribuído peso máximo para as áreas mais impermeabilizadas, úmidas e em corpos hídricos. Os pesos mínimos foram atribuídos para as áreas menos impermeabilizadas e densamente vegetadas, conforme demonstrado na Tabela 3.

**Tabela 3.** Pesos atribuídos para as classes de uso e cobertura do solo.

| Uso e Cobertura do Solo | Subclasse                  | Peso |
|-------------------------|----------------------------|------|
| Floresta                | Formação florestal         | 1    |
| Floresta                | Formação savânica          | 1    |
| Floresta                | Mangue                     | 5    |
| Agropecuária            | Silvicultura               | 3    |
| Agropecuária            | Pastagem                   | 3    |
| Agropecuária            | Mosaico de usos            | 3    |
| Área não vegetada       | Outras áreas não vegetadas | 5    |
| Corpos d'água           | Rio, lago e oceano         | 5    |

**Áreas Urbanas:** A intensidade e frequência das inundações aumentam em razão da urbanização, por expandir as áreas impermeabilizadas, e de determinadas atividades agrícolas que removem a cobertura vegetal do solo, reduzindo a interceptação da precipitação (Franco, 2015; Tucci, 2005). O mapa de áreas urbanas foi gerado a partir do mapa de uso e cobertura do solo utilizado no estudo. Desse modo foi atribuído peso 5 para as áreas urbanas e peso 1 para as demais áreas.

**Tabela 4.** Pesos atribuídos para o mapa de áreas urbanas.

| Classe        | Peso |
|---------------|------|
| Demais áreas  | 1    |
| Áreas urbanas | 5    |

**Pedologia:** Os solos condicionam uma rápida ou lenta infiltração de água, que varia de acordo com a sua respectiva taxa de infiltração, condicionando o volume de escoamento superficial (Magalhães et al., 2011). Os solos de textura arenosa possuem maiores taxas de infiltração, enquanto que os solos compostos por sedimentos finos (silte e argila), como também os solos compactados, possuem menores taxas de infiltração (Oliveira & Vieira, 2017; Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, 2006; Sartori et al., 2005). O mapa utilizado no artigo foi pela plataforma digital da EMBRAPA, em formato *shapefile* e em escala 1:100.000. Antes de reclassificá-lo, o arquivo em *shapefile* foi convertido para *raster*, com a mesma projeção e resolução espacial utilizada no estudo.

Os solos identificados com baixos coeficientes de infiltração receberam os menores pesos, enquanto os solos com altos coeficientes de infiltração, pesos maiores (Sartori et al., 2005). A Tabela 5 apresenta os pesos atribuídos às classes de solo.

**Tabela 5.** Pesos atribuídos para as classes de solo.

| Solo        | Peso |
|-------------|------|
| Latossolo   | 1    |
| Argilossolo | 4    |
| Chernossolo | 5    |
| Luvissolo   | 5    |

**Proximidade aos cursos d'água:** Eventos de precipitação intensa frequentemente resultam em um rápido aumento no nível dos corpos d'água, o que por sua vez leva a inundações nas regiões próximas às margens dos rios (Karymbalis et al., 2021). As áreas mais impactadas durante essas inundações são aquelas que estão em proximidade com esses corpos d'água (Waqas et al., 2021; Abidini; Abdelmansour, 2018). O Código Florestal, Lei Federal nº 12.651/12, estabelece Áreas de Proteção Permanente (APP), em zonas urbanas e rurais, as faixas no entorno de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, sem considerar os efêmeros, a partir da borda da calha do leito, variando de acordo com os intervalos de largura dos cursos, com o intuito de reduzir os riscos de inundação (BRASIL, 2012). A hidrografia da bacia foi obtida durante o procedimento de delimitação da BHRC pelo QGIS, em arquivo *shapefile*, sendo posteriormente convertido em arquivo *raster*. Foi aplicado um *buffer* nos cursos principais, com valores equivalentes a metade da largura média do curso mais a faixa de APP definida em função da respectiva largura do curso, que variaram entre 50 a 100 metros (Barbosa et al., 2021; Santos et al., 2017). Para as faixas de APP definidas, foi atribuído peso 5 enquanto nas demais áreas da bacia foi atribuído peso 1.

**Tabela 6.** Pesos atribuídos para as faixas de APPs.

| Classe       | Peso |
|--------------|------|
| Demais áreas | 1    |
| Faixa de APP | 5    |

Posteriormente foi realizado o julgamento comparativo entre os parâmetros, através da Matriz de Comparação Pareada, sendo assim calculado o peso de cada parâmetro que influencia suscetibilidade à inundação da BHRC (Campioli et al., 2019; Rezende et al. 2017). Para aplicar a Matriz de Comparação Pareada recorreu-se à escala de pesos definida por Saaty (1977), seguindo a ordem de importância, conforme apresentado no Quadro 1.

**Quadro 1.** Escala comparativa com os pesos de importância dos parâmetros.

| Importância Mútua                     | Valores |
|---------------------------------------|---------|
| Importância mútua                     | 1       |
| Moderadamente menos importante que    | 3       |
| Fortemente mais importante que        | 5       |
| Muito fortemente mais importante que  | 7       |
| Extremamente mais importante que      | 9       |
| Extremamente menos importante que     | 1/9     |
| Muito fortemente menos importante que | 1/7     |
| Fortemente menos importante que       | 1/5     |
| Moderadamente menos importante que    | 1/3     |

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Após realizar o cálculo da matriz, foi necessário avaliar a consistência dos resultados, devido ao número de comparações consideradas, que pode gerar inconsistências. Para essa avaliação calculou-se o Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC).

O Índice de Consistência verifica se a estimativa em relação aos pesos resultantes do AHP foi boa, sendo necessário comparar se o autovalor máximo da matriz está próximo ao número de parâmetros utilizados no estudo.

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

Onde:  $\lambda_{max}$  = autovalor máximo; n = número de parâmetros.

Para calcular a razão de consistência, utilizou-se o Índice Randômico (IR), obtido com base na tabela de valores para matrizes quadradas de ordem n estabelecida pela Oak Ridge National Laboratory, EUA, fornecido com base na quantidade de indicadores utilizados para o cálculo AHP.

Obtidos os valores do IC e do IR, calcula-se o valor de RC, que deve ser inferior a 0,1 (10%), para que haja consistência dos dados.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Obtidos os valores do IC e do IR, calcula-se o valor de RC, que deve ser inferior a 0,1 (10%), para haver consistência dos dados.

A operacionalização do método AHP foi realizada através do portal *Business Performance Management Singapore AHP Online Calculator* o qual, com a inserção dos parâmetros e definição de suas respectivas ordens de importância, calculou-

se: a Matriz de Comparação Pareada, o Índice de Consistência e a Razão de Consistência.

Na sequência, o mapa de suscetibilidade foi gerado com o auxílio da na calculadora *raster* do *software* QGis, calculando-se a média aritmética ponderada dos parâmetros (Equação 3).

$$MSI = \frac{MH \cdot P1 + MD \cdot P2 + MUCS \cdot P3 + MAU \cdot P4 + MP \cdot P5 + MPCA \cdot P6}{6} \quad (3)$$

Onde: MSI = Mapa de suscetibilidade a inundação; MH = Mapa hipsométrico; P1 = Peso mapa hipsométrico MD= Mapa de declividade; P2 = Peso do mapa de declividade; MUCS = Mapa de uso e cobertura do solo; P3 = Peso do Mapa de uso e cobertura do solo; MAU = Mapa de área urbana; P4 = Mapa de área urbana; MP = Mapa de pedologia; P5 = Peso do mapa de pedologia; MPCA = Mapa de proximidade aos cursos d'água; Peso do mapa de mapa de proximidade aos cursos d'água.

O mapa resultante apresenta pesos de suscetibilidade à inundação variando de 1 a 5. As áreas com peso 1 foram classificadas com muito baixa suscetibilidade; com peso 2, baixa suscetibilidade; com peso 3, média suscetibilidade; com peso 4, alta suscetibilidade e com peso 5, muito alta suscetibilidade.

### Mapa de Precipitações Extremas (3.2):

As cheias dos rios são provocadas principalmente pela precipitação, uma vez que eventos de grande intensidade podem causar inundações quando os leitos dos rios não têm capacidade suficiente para transportar o excesso de água a jusante (Rincón et al., 2018). Além disso, um aumento na intensidade das chuvas pode resultar em maior escoamento, já que o solo não consegue absorver a água rapidamente (Cabrera; Lee, 2019). Portanto, intensidades mais elevadas de precipitação estão diretamente relacionadas a uma maior frequência de inundações (Barbosa et al., 2022).

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) classifica as precipitações de acordo com intervalos de intensidade em milímetros por hora (mm/h). São classificadas como pesadas as chuvas com intensidade entre 10 a 50 mm/h e como violentas as chuvas com intensidade maior ou igual a 50 mm/h (World Meteorological Organization, 2021).

Para o desenvolvimento do mapa de precipitações extremas foi realizado uma interpolação de precipitações, por meio do complemento Interpolação IDW, com 10 anos de tempo de retorno e 60 minutos de duração, em 10 estações pluviométricas inseridas e no entorno da

BHRC, através de suas respectivas equações de Intensidade, Duração e Frequência (IDF).

Os parâmetros das IDF's das 10 estações utilizadas, foram adquiridos do estudo de Ferraz et al. (2020). As intensidades de precipitação calculadas variaram entre 39,49 mm/h a 58,53 mm/h. Os pesos no mapa foram atribuídos de acordo com 5 classes, correspondentes a intervalos de intensidade de precipitação, determinados com base na amplitude desses valores dividido por 5. O Quadro 2 apresenta as informações referentes às estações utilizadas e a Tabela 7 os pesos atribuídos às faixas de intensidade de chuvas extremas, onde "P" significa precipitação.

Quadro 2. Informações das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

| Código  | Altitude (m) | Latitude | Longitude | Precipitação (mm/ h) |
|---------|--------------|----------|-----------|----------------------|
| 1439001 | 151          | -14,81   | -39,47    | 45,48                |
| 1439002 | 210          | -14,86   | -39,66    | 39,42                |
| 1439089 | 163          | -14,87   | -39,59    | 45,47                |
| 1439044 | 243          | -14,96   | -39,81    | 46,88                |
| 1539008 | 182          | -15,14   | -39,72    | 48,41                |
| 1539016 | 180          | -15,15   | -39,77    | 47,76                |
| 1439010 | 78           | -14,79   | 39,05     | 58,64                |
| 1439019 | 55           | -14,80   | -39,27    | 49,72                |
| 1439023 | 107          | -14,68   | -39,39    | 41,90                |
| 1539002 | 153          | -15,09   | -39,35    | 47,21                |

Tabela 7. Pesos atribuídos para as classes de precipitações extremas

| Classes de Precipitações Extremas (mm/h) | Peso |
|------------------------------------------|------|
| 0 < P ≤ 43                               | 1    |
| 43 < P ≤ 47                              | 2    |
| 47 < P ≤ 51                              | 3    |
| 51 < P ≤ 55                              | 4    |
| P > 55                                   | 5    |

### Mapa de Vulnerabilidade Social (3.3):

A vulnerabilidade social conceitua-se como a presença simultânea, cumulativa ou sobreposta de condições de pobreza e privação social, juntamente como condições de exposição a riscos ambientais, ao qual estão presentes três elementos: a exposição ao risco, a falta de capacidade de reação e a dificuldade em se adaptar diante da ocorrência concreta do risco (Alves, 2013). Os indicadores sintéticos de vulnerabilidade são ferramentas empregadas na avaliação da vulnerabilidade social,

que representam medidas sintetizadas para capturar uma realidade social (Schumann, 2015).

O Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) no Brasil foi elaborado com base em dados do Atlas do Desenvolvimento Humano (ADH) e compreende dezesseis indicadores agrupados em três categorias principais: infraestrutura urbana, capital humano, renda e emprego. Esse índice oferece uma análise única da exclusão social e da vulnerabilidade social em relação aos municípios brasileiros (IPEA, 2015).

Com base no IVS de cada município inserido totalmente ou parcialmente na BHRC foi avaliado o grau de vulnerabilidade social na área de estudo. Para determinar a delimitação dos municípios foi utilizado a base vetorial dos limites dos municípios do estado Bahia, obtido pela plataforma digital do IBGE.

Os IVS variam em faixas de 0 a 1, sendo que de 0 a 0,200 considera-se que o município possui muito baixa vulnerabilidade social; de 0,201 a 0,300, baixa vulnerabilidade social; de 0,301 a 0,400, média vulnerabilidade social; de 0,401 a 0,500, alta vulnerabilidade social; e entre 0,501 e 1 muito alta vulnerabilidade social.

As faixas de valores de vulnerabilidade social foram relacionadas, em ordem crescente, a pesos de 1 a 5 correspondentes a graus de vulnerabilidade, para posteriormente elaborar o mapa de vulnerabilidade social da BHRC.

**Tabela 8.** Pesos atribuídos às classes de vulnerabilidade social

| IVS           | Peso | Vulnerabilidade Social |
|---------------|------|------------------------|
| 0 - 0,200     | 1    | Muito baixa            |
| 0,201 - 0,300 | 2    | Baixa                  |
| 0,301 - 0,400 | 3    | Média                  |
| 0,401 - 0,500 | 4    | Alta                   |
| 0,501 - 1     | 5    | Muito Alta             |

**Mapa de Risco de Inundação:** Para sobrepor os mapas de suscetibilidade, de Precipitação extrema e Vulnerabilidade Social foi inserido uma equação (Equação 1) na calculadora *raster* do *software* QGIS, a qual os mapas temáticos previamente elaborados foram os parâmetros somados e em seguida calculou-se a média aritmética deles, resultando no mapa de risco a inundação.

$$MRI = \frac{MSI + MPE + MVS}{3} \quad (4)$$

Onde: MRI = Mapa de risco a inundação; MSI = Mapa de suscetibilidade a inundação; MPE=

Mapa de precipitações extremas; MVS= Mapa de vulnerabilidade social.

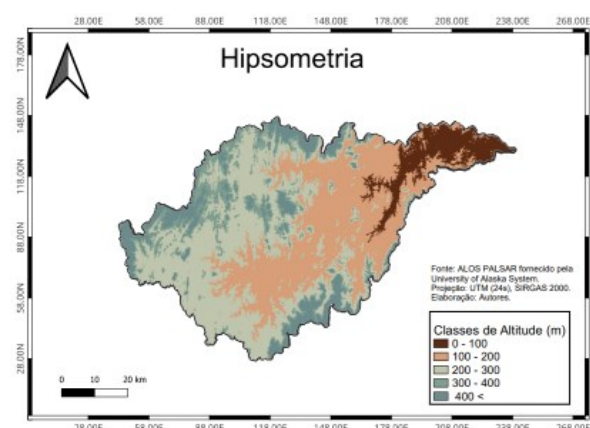
## Resultados e Discussões

Através da aplicação do SIG foi possível desenvolver mapas que representam o comportamento da Bacia Hidrográfica do rio Cachoeira quanto aos eixos de suscetibilidade (condições físicas da bacia), aos eventos extremos de precipitação e a vulnerabilidade social. E com a sobreposição dos eixos, o risco na área.

As Figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 apresentam os mapas inseridos no eixo de suscetibilidade. Mapas esses de: Hipsometria, Declividade, Uso e Cobertura do Solo, Área Urbana, Pedologia e Proximidade aos Cursos d'Água.

Ao analisar os mapas do eixo de suscetibilidade é possível visualizar, quanto a topografia que as regiões a jusante apresentam as menores altitudes, crescendo a montante. A centro norte, oeste e sul, observa-se a ocorrência de relevos fortes ondulados e montanhosos, porém, a bacia possui majoritariamente relevos planos, o que favorece a suscetibilidade à inundação.

Relativo ao uso e cobertura do solo as áreas antrópicas ocupam a maior parte da bacia, sendo a maior parcela para a pastagem, seguida pelas áreas de formação florestal, que a jusante se pode associá-la ao cultivo de cacau (Secretaria do Meio Ambiente, 2017), atenuando a suscetibilidade da bacia.



**Figura 2.** Mapa de Hipsometria

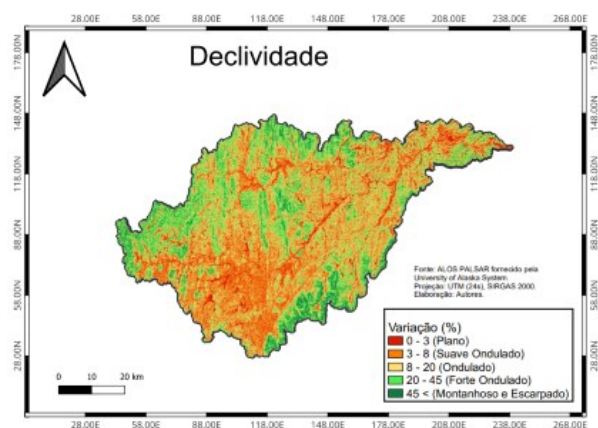


Figura 3. Mapa de Declividade

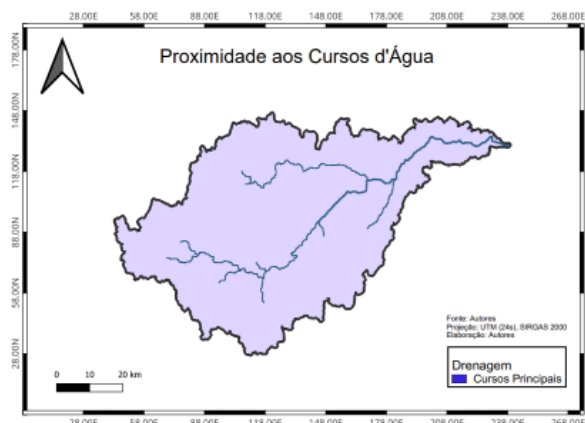


Figura 7. Proximidade aos Cursos d'Água

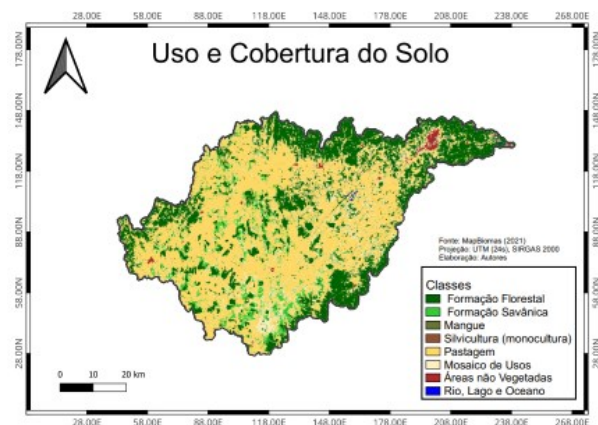


Figura 4. Mapa de Uso e Cobertura da Terra

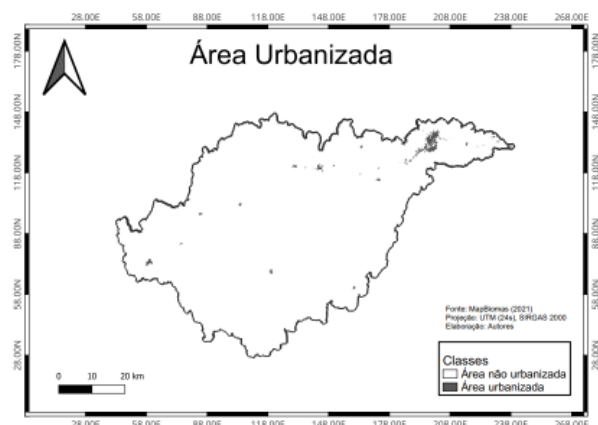


Figura 5. Áreas Urbanas

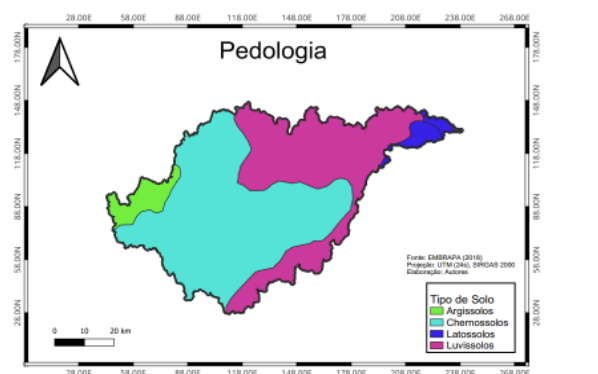


Figura 6. Pedologia

As áreas urbanas possuem menor representatividade na área, prevalecendo a jusante, próximo ao exutório da bacia, onde encontram-se os municípios de Itabuna e Ilhéus, elevando a suscetibilidade à inundação nessa porção.

Relativo à pedologia da bacia, pode-se observar quase em sua totalidade solos mais impermeáveis, representados pelos: Argilossolos, Chernossolos e Luvisolos. A leste, em uma quantidade bem pequena, são identificados latossolos, solos permeáveis.

Através do mapa de proximidade aos cursos d'água, observa-se nos trechos correspondente ao rio Cachoeira e em uma parcela a jusante do rio colônia, faixas de APP's mais largas, devido às maiores larguras médias. De maneira geral, áreas inseridas nas das faixas de APP possuem elevada suscetibilidade à inundação.

A Matriz de Comparação Pareada criada para identificar as áreas suscetíveis à inundação na BHRC foi elaborada como apresentado no Quadro 3. De acordo com os pesos encontrados, os parâmetros referentes a proximidades aos cursos d'água e as Áreas Urbanas apresentaram igualmente os maiores pesos, enquanto que a pedologia o menor peso.

Quadro 3. Matriz de Comparação Pareada.

| Parâmetro           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5 | 6   | Pesos  |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|---|-----|--------|
| Hipsometria (1)     | 1   | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 3 | 1/2 | 0,1137 |
| Declividade (2)     | 2   | 1   | 1/2 | 1/2 | 3 | 1/2 | 0,1436 |
| Uso e Cobertura (3) | 2   | 2   | 1   | 1/2 | 3 | 1/2 | 0,1812 |
| Áreas Urbanas (4)   | 2   | 2   | 2   | 1   | 3 | 1   | 0,2507 |
| Pedologia (5)       | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/3 | 0,0601 |

|                                          |   |   |   |   |   |   |        |
|------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|--------|
| <b>Proximidade aos cursos d'água (6)</b> | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0,2507 |
|------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|--------|

Após o cálculo dos pesos de cada parâmetro pela Matriz de Comparação Pareada, foi verificado a consistência dos resultados. O RC apresentou um valor de 3,4%, por esse valor ser menor 10%, as comparações realizadas podem ser consideradas consistentes e com resultados confiáveis, o autovalor máximo da matriz foi igual a 6,2, valor este, próximo ao número de parâmetros, indicando consistência no resultado conforme enfatizado por Saaty (1987).

Com os procedimentos supracitados, foi aplicado a Equação 3, em ambiente SIG, obtendo-se o mapa de suscetibilidade à inundação para a BHRC, apresentado na Figura 8.

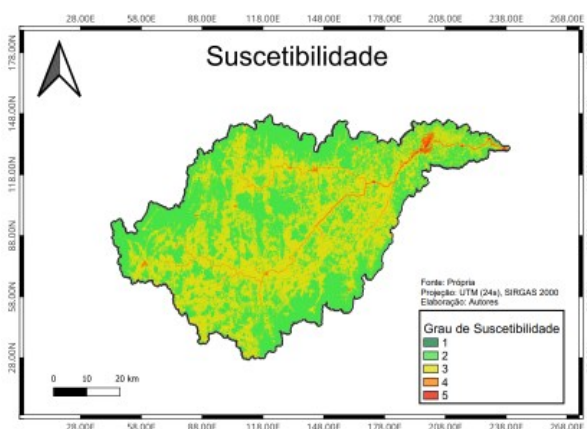


Figura 8. Mapa de Suscetibilidade a Inundação.

Em ambiente SIG, foi extraída a proporção percentual das áreas suscetíveis a inundação.

**Tabela 9.** Proporções das Áreas Suscetíveis a Inundação

| Suscetibilidade | Peso | Área (km²) | Taxa percentual (%) |
|-----------------|------|------------|---------------------|
| Muito Baixa     | 1    | 0,57       | 0,01%               |
| Baixa           | 2    | 2175,16    | 51,14%              |
| Média           | 3    | 1999,92    | 47,02%              |
| Alta            | 4    | 69,89      | 1,64%               |
| Muito Alta      | 5    | 7,47       | 0,18%               |
| Total           |      | 4253,01    | 100,00%             |

Pela Tabela 8, verifica-se que as áreas com baixa e média suscetibilidade representam 98,16%

da bacia. É possível observar que as áreas de média suscetibilidade, em 47,02% da área, estão distribuídas uniformemente pela bacia, com essa disposição sendo influenciada pelas regiões com relevo plano e uso da terra para a pastagem.

As porções com alta e muito alta suscetibilidade à inundação representam 1,65% do total da bacia. Estando concentradas nas áreas de entorno dos cursos d'água e nas partes urbanizadas, localizadas, de oeste para leste, pelos municípios de Itororó, Firmino Alves, Santa Cruz da Vitória, Itaju do Colônia, Ibicaraí, Itapé, Itabuna, Banco da Vitória e Ilhéus.

Entretanto, convém destacar que o município de Itabuna apresenta uma parcela significativa dessas áreas de alta e muito alta suscetibilidade a inundação, sendo influenciado principalmente por estar localizado na área de maior mancha urbana da bacia e com o rio Cachoeira o atravessando. Em menor proporção é observado no município a suscetibilidade a inundação sendo influenciada pelas altitudes menores que 100 metros e pelo solo de baixa permeabilidade presente na totalidade da área.

Estudos com objetivo de mapear áreas suscetíveis a inundações encontraram resultados similares, como em Barbosa et al. (2022) no município de Jaboatão dos Guararapes, em Pernambuco, que destacaram em seus resultados que aproximadamente 43,17% da área total do município, apresentou maior suscetibilidade a inundações e alagamentos, produto da combinação de alguns parâmetros, incluindo proximidade a corpos hídricos, baixas declividades e altitudes, urbanização e solos com baixa capacidade de infiltração, estando essas áreas mais concentradas a jusante da bacia.

Em estudo um estudo de Rezende e Marques (2017), que analisou a suscetibilidade de inundação na zona urbana de Paracatu no estado de Minas Gerais, utilizando a técnica do Processo Analítico Hierárquico com o uso do SIG, os resultados indicaram que as áreas de suscetibilidade alto e muito alto estão concentradas no sul da cidade, caracterizadas por intensa urbanização, baixas declividades e terreno plano, fatores que contribuem significativamente para a ocorrência de inundações. Em contrapartida, as áreas de risco baixo e muito baixo estão

distribuídas em regiões com relevo ondulado, presença de áreas permeáveis e cobertura vegetal, elementos que atuam como mitigadores, evitando inundações e promovendo uma melhor qualidade ambiental nas áreas urbanas.

O mapa de precipitação extrema desenvolvido está apresentado na Figura 9.

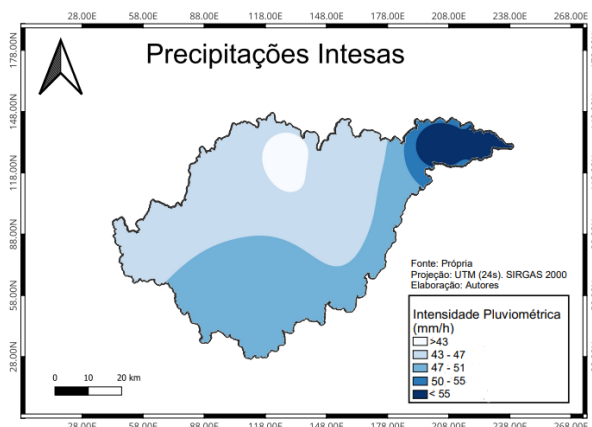


Figura 9. Mapa de Precipitações Extremas.

Em ambiente SIG, foi extraída a proporção percentual de áreas com a ocorrência de precipitação com os intervalos de intensidade definidos, estando apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10.** Proporção das áreas em intervalos de precipitações extremas

| Precipitações Extremas (mm/h) | Peso | Área (km <sup>2</sup> ) | %       |
|-------------------------------|------|-------------------------|---------|
| 39,49 – 43,27                 | 1    | 191,54                  | 4,50%   |
| 43,27 – 47,09                 | 2    | 2114,66                 | 49,63%  |
| 49,09 – 50,91                 | 3    | 1627,08                 | 38,19%  |
| 50,91 – 54,72                 | 4    | 93,60                   | 2,20%   |
| 54,72 – 58,53                 | 5    | 233,61                  | 5,48%   |
| Total                         |      | 4253,01                 | 100,00% |

Através da análise do mapa de precipitações extremas e da Tabela 10, visualiza-se que o raio de influência do intervalo de intensidade de grau 5 ocorre a jusante da bacia, majorando a probabilidade de ocorrência de inundações nessas regiões, correspondente a 5,48% da área da bacia.

O regime pluviométrico na BHRC foi abordado no estudo realizado por Farias e Gomes (2023) em sua análise do histórico de chuvas e vazões na BHRC. Eles observaram que as médias

anuais de precipitação diminuem à medida que se avança do litoral em direção ao interior, com valores variando de 1461,29 mm a 759,9 mm.

A Figura 10 apresenta o mapa de vulnerabilidade social desenvolvido para BHRC. Na Tabela 11 está apresentado os 22 municípios inseridos totalmente e parcialmente na delimitação da bacia com os seus respectivos IVS, já na tabela 12 é apresentado a proporção de áreas referente às classes dos IVS.

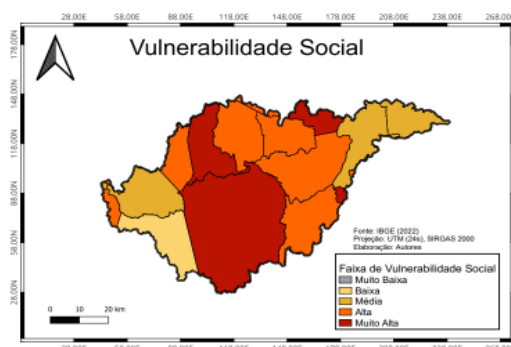


Figura 10. Mapa de Vulnerabilidade Social

**Tabela 11.** IVS dos municípios inseridos totalmente e parcialmente na bacia.

| Nome do Município   | IVS   |
|---------------------|-------|
| Itapetinga          | 0.283 |
| Itabuna             | 0.310 |
| Itoioró             | 0.380 |
| Ilhéus              | 0.387 |
| Caatiba             | 0.392 |
| Firmino Alves       | 0.406 |
| Ibicaraí            | 0.413 |
| Itambé              | 0.414 |
| Coaraci             | 0.422 |
| Itajuípe            | 0.445 |
| Buerarema           | 0.457 |
| Ibicuí              | 0.457 |
| Nova Canaã          | 0.458 |
| Jussari             | 0.461 |
| Pau Brasil          | 0.461 |
| Camacan             | 0.488 |
| Almadina            | 0.492 |
| Floresta Azul       | 0.496 |
| Itapé               | 0.496 |
| Itaju do Colônia    | 0.515 |
| São José da Vitória | 0.517 |
| Barro Preto         | 0.526 |
| Arataca             | 0.536 |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| Santa Cruz da Vitória | 0.561 |
|-----------------------|-------|

**Tabela 12.** Proporção de áreas com as respectivas classificações do IVS

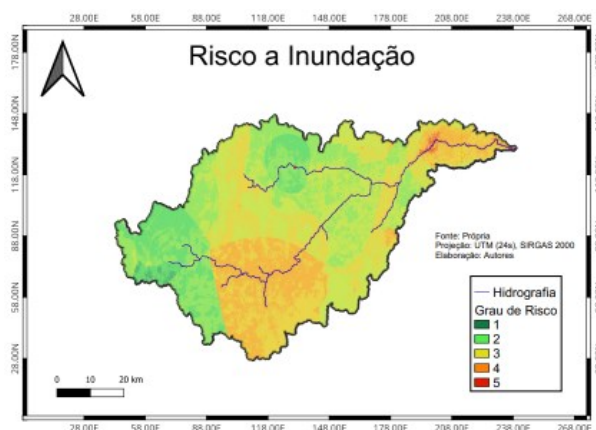
| Classificação IVS | Peso | Área (km²) | %    |
|-------------------|------|------------|------|
| Baixa             | 2    | 304,47     | 7%   |
| Média             | 3    | 766,75     | 18%  |
| Alta              | 4    | 1551,32    | 36%  |
| Muito Alta        | 5    | 1630,56    | 38%  |
| Total             |      | 4253,01    | 100% |

O município de Itapetinga apresenta menor vulnerabilidade social, estando parcialmente inserido na bacia, na porção de extremo oeste. O município de Jussari apresentou o maior índice de vulnerabilidade social e está localizado mais a montante da bacia.

BHRC apresentam majoritariamente em sua delimitação as classificações de alta e muito alta vulnerabilidade social, 74% da área da bacia, sendo que 38% desse valor corresponde a áreas de muito alta vulnerabilidade social e conforme apresentado na Figura 10, estão mais concentradas mais a montante da bacia.

Prevalece a jusante da bacia, sua parte mais urbanizada, áreas com média vulnerabilidade social, onde localizam-se os municípios de Itabuna e Ilhéus.

Após o desenvolvimento dos mapas de suscetibilidade à inundação, precipitações extremas e de vulnerabilidade social, em ambiente SIG foi gerado o mapa de risco a inundação pela aplicação da Equação 4. Na Figura 11 está apresentado o mapa de risco de inundação.



**Figura 11:** Mapa de Risco a Inundação

Em seguida foi gerado a planilha com a proporção de áreas de risco. Apresentado na tabela 13.

**Tabela 13.** Proporção das Áreas com Risco à Inundação

| Risco | Grau        | Área (km²) | %       |
|-------|-------------|------------|---------|
| 1     | Muito baixo | 0          | 0,00%   |
| 2     | Baixo       | 26,96      | 0,63%   |
| 3     | Médio       | 2572,20    | 60,48%  |
| 4     | Alto        | 1647,11    | 38,73%  |
| 5     | Muito alto  | 6,71       | 0,16%   |
| Total |             | 4253,01    | 100,00% |

A bacia possui 60,48% da sua área com médio risco de inundação, 38,73% com alta risco a inundação e 0,16% com muito alto risco de inundação.

Analisando a região mapeada verifica-se que as áreas com muito baixo e baixo risco a inundação localizam-se em grande proporção a montante da bacia, locais esses que possuem declividades elevadas e elevadas altitudes, além das menores intensidades de precipitações extremas e municípios com baixa e média vulnerabilidade social

A porção sudoeste apresenta, significativamente, regiões com alto risco de inundação, estando associado ao uso do solo para a pecuária, aos relevos planos, as intensidades pluviométricas elevadas e a vulnerabilidade social, a qual é muito alta.

A porção a jusante da bacia, configura-se áreas, predominantemente, com alto e muito alto risco a inundação, isso se deve a urbanização, as baixas altitudes, proximidade ao rio cachoeira e a alta intensidade pluviométrica da área.

Em trabalhos similares foi possível observar resultados próximos como no estudo de Campioli e Vieira (2019), na bacia do rio Cubatão do Norte, em Santa Catarina, na qual foram encontradas áreas com um elevado grau de risco de inundação concentradas em regiões urbanas densamente povoadas, caracterizadas por menores altitudes e declividades.

## Conclusões

O presente estudo teve como objetivo identificar as áreas críticas com risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, no sul do estado da Bahia. A metodologia empregada para o desenvolvimento do mapa de risco de inundação, baseou-se na combinação do uso de tecnologia de Sistema de Informação Geográfica (SIG) com o Método de Análise Hierárquica (AHP). Foram considerados fatores associados à suscetibilidade a inundação, as precipitações intensas e a vulnerabilidade social da área que contribuem para a ocorrência desses desastres hidrológicos.

Os resultados obtidos revelaram que 38,73% da área total da bacia, apresenta risco alta a inundação, e 0,16% risco muito alto. Essas áreas são caracterizadas pela convergência de vários fatores, porém principalmente as baixas declividades, intensa urbanização, proximidade aos cursos d'água, intensidade pluviométrica e a vulnerabilidade social.

Além disso, os resultados indicaram que 60,48% do território da bacia tem risco médio de inundações e alagamentos, enquanto apenas 0,68% da área apresenta baixo risco. Essas últimas áreas estão geralmente localizadas em regiões rurais, com terrenos mais íngremes, altitudes mais elevadas.

A abordagem utilizada neste estudo para mapear áreas críticas com risco de inundação apresenta várias vantagens em termos de aplicabilidade e viabilidade. Isso possibilita tomadas de decisão mais integradas por parte dos gestores e profissionais da área. Essa abordagem é particularmente vantajosa devido ao seu baixo custo e a facilidade de manipulação dos dados, permitindo uma ampla gama de aplicações, especialmente aos gestores públicos para tomadas de decisões mais assertivas quanto ao planejamento urbano e ambiental, de forma a reduzir os desastres de natureza hidrológica.

A metodologia utilizada neste estudo para mapear áreas críticas com risco de inundação apresenta várias vantagens em termos de aplicabilidade e viabilidade. Essa abordagem possibilita tomadas de decisão mais integradas por

parte dos gestores públicos e profissionais da área, devido ao enfoque em escala de macrobacia, além da incorporação na análise de condicionantes climáticos (precipitação) e sociais, não se limitando apenas à suscetibilidade (características físicas da bacia), como ocorre na maioria dos estudos sobre risco de inundação em bacias hidrográficas. Isso permite uma visão abrangente das áreas vulneráveis, orientando políticas públicas mais direcionadas e eficazes e assim, promovendo um planejamento urbano e ambiental mais sustentável, resiliente e equitativo.

No entanto, para uma análise mais robusta, recomenda-se para futuros trabalhos uma avaliação mais discretizada dos índices de vulnerabilidade social por município. Essa abordagem mais detalhada não apenas complementa a análise global de risco de inundação, mas também amplia a compreensão sobre fatores socioeconômicos que podem influenciar a resiliência das comunidades locais frente às mudanças climáticas e aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -

CAPES pela concessão de bolsa para o desenvolvimento dessa pesquisa, no âmbito do projeto aprovado pelo PEPEEC - Programa Emergencial de Prevenção e Enfrentamento de Desastres Relacionados a Emergências Climáticas, eventos extremos, acidentes ambientais.

## Referências

- Alaska Satellite Facility (ASF) (2015). "ASF Radiometric Terrain Corrected Products—Algorithm Theoretical Basis Document". Disponível em: [https://asf.alaska.edu/wpcontent/uploads/2019/03/rtc\\_atbd\\_v1.2\\_final.pdf](https://asf.alaska.edu/wpcontent/uploads/2019/03/rtc_atbd_v1.2_final.pdf). Acesso em: 15 nov. 2021.
- Barbosa, I. M. B. R., Neto, A. G. P.; Silva, S. R. (2021). Mapeamento das áreas de risco de inundação da bacia hidrográfica do rio Jaboatão, em Pernambuco, utilizando o método *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*). Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/228934>. Acesso em: 20 set. 2023.

- Bacelar, L., Ferreira, R., Costa, I. Rodrigues, M., Camargo, H., Lindbergh, S., Caram, R., Carlos, De Angelis, F., Tomasella, J., R., & Damé, C. (2023). *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* limiares de chuva deflagradores de inundação brusca para bacias da região serrana do Rio de Janeiro: radar meteorológico versus pluviômetros. Disponível em: [https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/9bba18c7a49b8208c4f24822b842443d\\_151f62daeaff6c641902faf4ccf9f80b.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/9bba18c7a49b8208c4f24822b842443d_151f62daeaff6c641902faf4ccf9f80b.pdf). Acessado em: 25. out. 2023
- Bega, J., Ribeiro, N., Lima, C. (2019). Suscetibilidade a enchentes: estudo de caso na microbacia hidrográfica do Córrego da Onça em Três Lagoas - MS. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista* v. 15.
- Brandão, M. (2021). “Enchente deixa moradores de bairro de Ilhéus sem casa”. *Agência Brasil*. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-12/enchente-deixa-moradores-de-bairro-de-ilheus-sem-casa>. Acesso em: 5 jun. 2023.
- Brasil. Instituto de Pesquisa Tecnológica. (2007). *Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios*. Brasília: Ministério das Cidades. 2007. 176 p.
- Brasil, Lei Federal. (2012). *Código Florestal Brasileiro* – Lei Nº12. 651. Brasília, 2012.
- Brasil, 2012. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. (2012). Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC.
- Business Performance Management Singapore (BPMSG). (2024). *AHP online calculator*. Singapore. Disponível em: <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php>. Acesso em: 19 jun. 2024.
- Cabrera J. S., Lee H. S. (2029). Flood-Prone Area Assessment Using GIS-Based Multi-Criteria Analysis: A Case Study in Davao Oriental, Philippines. *Water*. 2019; 11(11):2203. <https://doi.org/10.3390/w11112203>.
- Campioli, P. & Voos V., C. (2019). Avaliação do Risco a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 12. 10.26848/rbgf.v12.1.p124-138.
- Correia, E. F. G., Ribeiro, G. P., Baptista, A .C. (2015). Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. *Revista Brasileira de Cartografia* 67, 1183-1202.
- Choo, J., Y., & Lee. (2019). A Study on the Improvement of Flood Forecasting Techniques in Urban Areas by Considering Rainfall Intensity and Duration. *Water*, 11(9), 1883. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w11091883>. Acessado em: 25. out. 2023.
- Crispim, D. L Proposta de Ferramenta para Avaliação de Áreas com Risco de Inundações: um estudo de Caso na Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim (BHRM), Pará. *Revista Geonorte*, v.14, n.44, p.127-151, 2023. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2023.V.14.N.44.127.151>
- De Lima, E. R. V; De Souza, M. de F. B. Proposta Metodológica de Avaliação da Suscetibilidade à Degradação Ambiental. 2023.
- Emergency Events Database - EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: <<http://www.em-dat.net/>>. Acesso em: 02 jun. 2024
- Engelbrecht, B. Z, Gonçalves, R. D. TERAMOTO, E. H. & CHANG, H. K. (2019). “Disponibilidade hídrica e balanço hídrico da bacia do rio Cachoeira na região de Itabuna/BA”. *Geociências*, v. 38, n. 3, p. 731-740.
- Ferreira Filho, D. F.; Sousa Filho, H. N. (2022). *Identificação de áreas com risco de inundações em Oriximiná-PA: contribuições a elaboração do zoneamento ambiental municipal*. Orientador: Daniel Araújo Sombra Soares. 2022. [25 f]. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Especialização em Tecnologias Aplicadas a Regularização Fundiária e Prevenção de Conflitos Socioambientais, Habitacionais e Sanitários: Rede Amazônia) – Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/4685>. Acesso em: 12 set. 2023.
- Fonseca Neto, G. C., Silva Junior, M. A. B., Rodrigues, A. B., Neto, A. R., & Cabral, J. J. da S. P. (2020). Modelagem Bidimensional para a Verificação Hidráulica da Canalização de um Trecho do Rio Frágoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(6), 2963. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2963-2977>
- Franco, A. C. V., Dal Santo, M .A., (2015). Contribuição da morfometria para o estudo das inundações na sub-bacia do rio Luís Alves/SC. *Mercator* 14, 151-167.
- Goerl, R.F., Kobiyama, M., Pellerin, J. R. G. M., (2012). Proposta Metodológica para Mapeamento de Áreas de Risco a Inundação:

- Estudo de Caso do Município de Rio Negrinho – SC. *Boletim de Geografia* 30, 81-100.
- Gouveia, A., Rosa, S., & Beltrão, M. (2022). Mapeamento das áreas suscetíveis as inundações e aos alagamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. *Boletim de Geografia*, 40, 277–296. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v40.a2022.e63948>.
- Guha-Sapir, D., Below, R., Hoyois, P., (2017). EM/DAT: *International Disaster Database* Disponível: <https://www.emdat.be>. Acesso: 24 out. 2023.
- Kelman, J. (2024). Agência de Águas é vital para gerenciamento hídrico. *Folha de S. Paulo*, São Paulo, 13 jun. 2024. Acesso: 06 jun. 2024.
- Hora, S. B., Gomes, R. L. (2009). Mapeamento e avaliação do risco à inundação do rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 2, n. 21, p.57-75, ago. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/sn/v21n2/a05v21n2.pdf>. Acesso em: 01 set. 2016.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2023. *Censo Brasileiro de 2023: Características da popula o e dos domicílios*. Disponível em: <http://https://cidades.ibge.gov.br>. Acessado em: 6 set. 2023.
- Lacerda de Andrade, S., Ferreira, O. V., Mendes, M. S. (2014). Elabora o de um mapa de risco de inunda es da bacia hidrográfica do córrego São Pedro,  rea urbana de Uberlândia-MG. *Caderno de Geografia*. 2014, 24(41), 1-16. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333229407001>.
- Lopes, E. R. N et al., (2019). Avalia o do risco de inunda o em Sorocaba - Brasil, usando lógica e geotecnologia fuzzy. *Brazilian Journal of Development* 5, 1422-1434.
- Karymbalis, E., Andreou, M. & Batzakis, D. V., Tsanakas, K. & Karalis, S. (2021). Integration of GIS-Based Multicriteria Decision Analysis and Analytic Hierarchy Process for Flood-Hazard Assessment in the Megalo Rema River Catchment. *East Attica*, Greece. 10.3390/su131810232.
- Magalhães, I. A. L.; Thiago, C. R. L.; Agrizzi, D. V.; Santos, A. R. (2011). Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inunda o em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. *Cadernos de Geociências*, v. 8, n. 2, nov. 2011, p. 63-70. Disponível em: <http://www.portalseer.ufba.br/index.php/cadgeo/article/viewFile/5288/4036>. Acesso em: 12 set. 2023.
- Marengo, J. A., Seluchi, M. E., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Goncalves, D., Sperling, V. B., Ramos, A. M., Dolif, G., Saito, S., Bender, F., Lopes, T. R., Alvala, R. C., & Moraes, O. L. (2023). Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2023. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z>.
- MapBiomias (2021). Cole o MapBiomias. Disponível em: [https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR). Acesso: 6 set. 2021.
- MapBiomias Projeto (2021). Cole o 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Disponível em: [https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-7/lcl/coverage/brasil\\_coverage\\_1985.tif](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-7/lcl/coverage/brasil_coverage_1985.tif).
- Mendes, Y., Ribeiro, V., Paranhos Filho, . & Galbetti, T.. (2020). Álgebra de Mapas na Elabora o de Carta de Risco a Inunda o. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. 43. 10.11137/2020\_2\_349\_362.
- Moreira, L.L. Brito, M.M. Kobiyama, M. Review article: A systematic review and futureprospects of flood vulnerability indices. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 1513–1530, 2021. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1513-2021>.
- Neto, A. G. P. Silva, S. R. Barbosa, I. M. B. R. Mapeamento das áreas suscetíveis às inunda es e aos alagamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. *Bol. Geogr., Maringá*, v40, a2022, e63948, p277-296.
- Norbiato, D., Borga, M., Esposti, S., Gaume, E. & Anquetin, S. (2008). Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*. 362. 274-290. 10.1016/j.jhydrol.2008.08.023.
- Oliveira, N. G., Vieira, C. V. (2017). Soil loss estimate in the Cubatão do Norte river hydrographic basin, northeast of Santa Catarina, Brazil, *International Journal of Development Research* 7, 13887-13895.
- Organiza o Pan-Americana da Saúde. 2015. Ministério da Saúde (BR). Desastres naturais e saúde no Brasil. Brasília, OPAS, 56 p.

- Portela, B.M.; Alves, G.B.; Silva, S.R.; Lafayette, K.P.V. Análise da vulnerabilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do rio Sirinhaém, utilizando o Método de Análise Hierárquica. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.16, n.03, 2023, pp. 1247-1262.
- Prochmann, J. R. (2014). Análise espacial da susceptibilidade a inundações na bacia hidrográfica do Córrego Grande, Florianópolis – SC. Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental Centro Tecnológico – CTC, Universidade Federal de Santa Catarina, Trabalho de Conclusão de Curso.
- Rezende, P. S., & Marques, D. V. (2017). Mapeamento de riscos a inundação na área urbana de Paracatu – MG. *Os Desafios Da Geografia Física Na Fronteira Do Conhecimento*, 1, 4884–4896. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2198>. Acesso em: 12 set. 2023.
- Ribeiro Neto, A.; Batista, L. F. D. R.; Coutinho, R. Q. (2016). Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. *RBRH* vol. 21 no .2 Porto Alegre abr./jun 2016 p. 377 – 390. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p377-390>
- Rincón D, Khan UT, Armenakis C. Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis: A Greater Toronto Area Case Study. *Geosciences*. 2018; 8(8):275. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080275>.
- Santos, Franc lio de Amorim dos; Cruz, Maria L cia Brito da; Mendes, L cia, Maria Silveira. Socio-spatial vulnerability to droughts and floods in the Piracuruca river hydrographic sub-basin (Ceará-Piauí/Brazil). *Soc. Nat. Uberlândia, MG*, v.32, p.304-316, 2020; ISSN 1982-4513. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49160>
- Santos, Thiago Gonçalves; Ventorini, Silvia Elena.; Almeida, Gustavo Pyra. Mapeamento de áreas suscetíveis a ocorrência de enchentes e inundações na Bacia Do Córrego Do Lenheiro. In: Giovanni Seabra. (Org.). *Terra paisagens, solos, biodiversidade e os desafios para um bom viver*. 1. ed. Ituiutaba: Barlavento, 2016, v. 1, p. 1331-1341.
- Schumann L, R, M, A; Moura L, B, A.  ndices sintéticos de vulnerabilidade: uma revisão integrativa de literatura. *Ciênc Saúde Coletiva*. 2015;20(7):2105-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-81232015207.10742014>.
- Sartori, A.; Neto, F.; Genovez, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V.10, n.4, p.5-18, 2005.
- Silva et al. Identificação e Hierarquização de Risco a Inundações em áreas de Bacias Hidrográficas. *Revista UNG – Geociências* V. 21, N. 2, 2022. DOI: 10.33947/1981-741X-v21n2-5018
- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa -SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- Tucci, Carlos E. M. Gestão de  guas Pluviais Urbanas. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco, 2005. Disponível em [http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/institucional/grupos-detrabalho/residuos/docs\\_resid\\_solidos](http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/institucional/grupos-detrabalho/residuos/docs_resid_solidos). Acesso em 12 set. 2023.
- Instituto de Pesquisa Econ mica Aplicada (IPEA). 2015. Atlas da vulnerabilidade social nos municípios brasileiros. Brasília.
- Zacharias, Andrea Aparecida. A representação gráfica das unidades de paisagem no zoneamento ambiental. São Paulo: Editora Unesp, 2007. 211 p.sto de 2014.
- Zine el Abidine, Roukh & Abdelmansour, Nadji. (2018). Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l’analyse multicrit re et SIG : Cas de la wilaya d’Oran Nord-Ouest de l’Alg rie.
- Waqas, H.; Lu, L.; Tariq, A.; Li, Q.; Baqa, M.F.; Xing, J.; Sajjad, A. Flash Flood Susceptibility Assessment and Zonation Using an Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model for the Chitral District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Water* 2021, 13, 1650. <https://doi.org/10.3390/w13121650>.
- Secretaria do Meio Ambiente - Bahia., 2017. “Plano estratégico para revitalização da bacia do rio Cachoeira, RP4 - Mapeamento da degradação da bacia (Vol. 1)”. [Relatório]. Disponível em: <http://cachoeira.nemusconsulting.com>. Acesso em: 6 set. 2023.
- Pisani, M. A. J. Gestão de riscos urbanos e a habitação socual no Brasil. In: Gestão Urbana e Sustentabilidade. Editores: Arlindo Philippi Jr e Gilda Collet Bruna. 1. Ed. São Paulo: Manole, 2019.
- World Meteorological Organization (2021). Guide to Instruments and Methods of Observation: Volume I – Measurement of Meteorological Variables. Genebra, Suíça: Organização Meteorológica Mundial, no. 8. Disponível em: [https://library.wmo.int/viewer/68695/download?file=8\\_I-2023\\_en.pdf&type=pdf&navigator=1](https://library.wmo.int/viewer/68695/download?file=8_I-2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1)