

VULNERABILIDADE À INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UNA - PE UTILIZANDO ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSO

VULNERABILITY TO FLOOD IN THE UNA RIVER WATER BASIN - PE
USING A HIERARCHICAL PROCESS ANALYSIS

Fernanda Cláudia Barboza da Silva Leal

fcbs@a.recife.ifpe.edu.br

Profa. Dra. Ioná Maria Beltrão Rameh Barbosa

ionarameh@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

O descompasso entre o gerenciamento dos recursos hídricos e o planejamento do uso do solo resulta na ocupação desordenada nas margens dos rios comprometendo a qualidade de vida da sociedade. A bacia hidrográfica do rio Una possui um histórico de inundações, evidenciando a grande importância de monitoramento de áreas de risco, as quais se têm como objetivo identificar no presente estudo. O mapa de vulnerabilidade à inundação foi desenvolvido com auxílio da metodologia proposta por Saaty (1980) aliado à álgebra de mapas realizada num sistema de informações geográficas. Na análise hierárquica de processo, as variáveis que mais influenciaram foram a declividade e a hipsometria, seguidas do uso do solo e, por último, da pedologia. Os resultados obtidos demonstraram que as áreas de maior vulnerabilidade à inundação compreenderam principalmente a faixa de menor altitude no exutório da bacia e próximas à margem do rio. Problemas relacionados com inundações podem ser minimizados adotando-se medidas estruturais e medidas não estruturais aliadas à técnicas de geoprocessamento.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Susceptibilidade. Geoprocessamento.

ABSTRACT

The mismatch between water resources management and land use planning results in disorderly occupation on river banks compromising the quality of life of society. The Una river basin has a history of flooding, highlighting the great importance of monitoring risk areas, which we intend to identify in the present study. The flood vulnerability map was developed using the methodology proposed by Saaty (1980) combined with map algebra performed in a geographic information system. In the hierarchical process analysis, the variables that most influenced were slope and

hypsometry, followed by land use and, finally, pedology. The results show that the areas most vulnerable to flooding comprised mainly the lower elevation range in the basin and near the river bank. Flood-related problems can be minimized by adopting structural and non-structural measures combined with geoprocessing techniques.

Keywords: Water resources. Susceptibility. Geoprocessing.

1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre risco de inundação está presente em diversos estudos acadêmicos, governamentais e empresariais por afetar o homem e o meio natural, acarretando diversos tipos de problemas, desde financeiros até culturais.

Segundo Miranda (2016) as enchentes são fenômenos temporários que correspondem à ocorrência de vazões elevadas num curso de água, com eventual inundação dos seus terrenos marginais. Quando ocorre precipitação de alta intensidade, a quantidade de água que chega ao rio pode ser superior à sua capacidade de drenagem, transbordando assim o corpo hídrico, passando a água a ocupar a área de sua calha maior.

Tucci e Bertoni (2003) mencionam que a urbanização desordenada ocasiona o aumento das vazões máximas, erosão das margens dos cursos d'água e aumento da produção de sedimentos, que juntamente com outros poluentes provenientes dos centros urbanos, são transportados para os corpos hídricos e deterioram a qualidade da água superficial e subterrânea. Os autores ainda citam que a urbanização sem planejamento tende a construir sistemas de drenagem inadequadas, que visam apenas o escoamento rápido da água precipitada, aumentando a magnitude da vazão, a frequência e o nível de inundações a jusante.

Os fatos apresentados são uma realidade na maioria das cidades brasileiras, visto que existem muitos entraves sociais e jurídicos para remoção de edificações e obras já implantadas em nascentes, Áreas de Preservação Permanente (APP's), várzeas dos rios, entre outros. Os dados publicados pela *Emergency Events Database – EM-DAT* – indicam que o Brasil está entre os países mais atingidos por desastres hidrológicos (TOMINAGA, 2009).

O monitoramento e gerenciamento de áreas de riscos são legitimados pela Lei 12.608, de 10 de abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). O art. 4º, do parágrafo IV dessa lei, prevê como diretriz a adoção de Instituto Federal de Pernambuco. Campus Recife. Curso de Graduação em Engenharia Civil. 14 de agosto de 2019.

bacia hidrográfica como unidade de análise de desastres e também estabelece que cada município identifique, mapeie as áreas de risco e realize estudos de identificação de ameaças, suscetibilidade, vulnerabilidade e riscos de desastres ambientais. Além disso, o referido instrumento jurídico prevê a criação de mecanismos de controle e fiscalização para evitar a edificação em áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

Na literatura científica, o termo “risco”, no contexto dos desastres naturais, abrange as noções de incerteza, exposição ao perigo, perdas, prejuízos materiais, econômicos e humanos. Já “vulnerabilidade” corresponde ao grau de perda dentro de uma determinada área suscetível à ocorrência de algum fenômeno, seja de aspectos físicos, econômicos, sociais e ambientais (TOMINAGA, 2009).

Contribui para o aumento dos riscos a concentração populacional na área urbana, onde, segundo dados do Censo de 2010 residem 84,35% da população brasileira. Esse nível de concentração da ocupação urbana se dá, na maioria das cidades, sem um planejamento adequado. Uma das consequências dessa desordem é o constante estado de risco a que a população está exposta, ocupando espaços inadequados à moradia como a proximidade a encostas de morros e de rios (REZENDE et al., 2017).

O aumento populacional, através de migrações quanto de urbanizações espontâneas, resulta no desaparecimento de áreas de armazenamento, e escoamento das águas da chuva pelo solo urbano. Além disso, a urbanização de forma descontrolada provoca a impermeabilização do solo, aumentando o volume de escoamento, e também a substituição da cobertura vegetal, alterando assim a biodiversidade do meio (BORGES et al. , 2015).

Com a ocupação urbana na planície de inundação, o processo de extravasamento das águas do leito normal de um rio, que antes era considerado um fenômeno natural, acaba por se caracterizar como um desastre natural. Diante disso a população, via de regra menos favorecidas, passa a sofrer consequências negativas, com prejuízos financeiros e sociais (CAMPIOLI; VIEIRA, 2019).

Por esse motivo, estudos em bacias hidrográficas não se restringem somente em seus aspectos físicos, mas se baseiam em aspectos relacionados às dinâmicas natural, econômica e social, considerando as alterações decorrentes das

interferências humanas. Sendo assim, a análise dos desastres e riscos naturais deve levar em consideração tanto a dinâmica dos sistemas ambientais quanto dos sistemas sociais e suas influências mútuas (CAMPIOLI; VIEIRA, 2019).

Além de perdas materiais e humanas, as consequências do escoamento das águas pelo solo urbano são formadas por enchentes, inundações, erosões, deslizamentos e assoreamentos. Portanto, para evitar a ocorrência de tais fatores, as instalações de drenagem são construídas para fazer com que essas águas sejam escoadas, e infiltradas no solo, tanto na zona urbana quanto na zona rural (BORGES et al. , 2015).

Nesse contexto, tecnologias de mapeamento de risco são importantes no planejamento urbano, principalmente em cidades brasileiras com carência de dados espaciais precisos e sem profissionais capacitados para elaborar e interpretar mapas de risco.

Dessa forma, o uso de geotecnologias contribui para mostrar quais áreas podem ou não ser ocupadas pela população para fins de moradia, sobretudo nas zonas urbanas, quais áreas precisam ser preservadas e, daquelas já ocupadas, quais estão ou não suscetíveis a riscos e qual o grau destes, em particular, os relacionados à inundação. Os mapeamentos e análises realizados a partir das geotecnologias apresentam resultados adequados à realidade e às necessidades locais para uma efetiva tomada de decisão por parte do poder público.

Partindo da importância dos estudos sobre tal temática, este trabalho tem por objetivo analisar os riscos de inundação na bacia hidrográfica do rio Una, por meio da elaboração do Modelo de Reclassificação de Variáveis (MRV) e aplicação da técnica de processo analítico hierárquico (AHP) com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos utilizados na elaboração desta pesquisa.

2.1 Sistemas de Informações Geográficas

Para auxiliar na identificação das áreas vulneráveis à inundação, uma ferramenta bastante difundida e utilizada atualmente é o geoprocessamento.

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser definido como uma ferramenta do geoprocessamento, que permite o armazenamento, a manipulação e o compartilhamento de dados de um determinado local tendo como base a escala ou o nível de detalhamento geográfico. O SIG está atrelado a um Banco de Dados Geográficos (BDG), cujo conteúdo reúne um conjunto de informações que possibilitam consultas, modelagem e análises para tomada de decisão (LONGLEY et al., 2013).

2.2 Álgebra de mapas

Em se tratando de um processo de múltiplas causas, a vulnerabilidade à inundação deve ser estudada através do cruzamento de diversas variáveis, as quais podem ser incorporadas a um Sistema de Informações Geográficas e, desta forma, permitir uma abordagem multicritério dos riscos.

Dentro de um ambiente SIG uma das formas de se realizar uma análise multicritério é através da álgebra de mapas. Esse processo consiste em uma operação matemática de média ponderada, na qual se consideram os valores de influência de cada variável e os pesos atribuídos a cada uma de suas classes (MOURA, 2007).

2.3 O método de análise multicritério - *Analytic Hierarchy Process*

Na literatura são encontrados inúmeros estudos que aplicaram o método AHP apoiando problemas de tomada de decisão com contextos econômicos, políticos, ambientais e sociais. Tal método foi criado por Thomas Saaty, em 1978, na Universidade da Pensilvânia.

O AHP auxilia o especialista na tomada de decisão e tem o objetivo de determinar a contribuição de cada variável dentro do foco de estudo (MOURA, 2007). O método da AHP é aplicado por meio de comparação de dois a dois dentro de cada um dos critérios apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Análise Hierárquica de Processo (AHP)

Pesos	Definição
1	Importância igual: Os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada: Um fator é ligeiramente mais importante que o outro.

Pesos	Definição
5	Importância essencial: Um fator é claramente mais importante que o outro.
7	Importância demonstrada: Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática.
9	Importância extrema: A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2,4,6,8	Valores intermediários entre julgamentos: Possibilidade de compromissos adicionais.

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Conforme argumentado anteriormente, na estruturação do método é considerada a comparação entre as variáveis. Dessa forma, a dominância é medida em termos de importância relativa entre os elementos estudados. Para realização desta comparação são utilizadas matrizes quadradas de elementos ($n \times n$), como demonstrado na Figura 1, nas quais as linhas e as colunas correspondem às n variáveis analisadas. Assim, o valor a_{ij} é a importância relativa obtida pela comparação do variável na linha i com relação à variável na coluna j .

Figura 1 - Elementos de uma matriz de decisão

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} a_{ij} > 0 \rightarrow \text{positiva} \\ a_{ij} = 1 \div a_{ji} = 1 \\ a_{ij} = 1/a_{ji} \rightarrow \text{recíproca} \end{array}$$

Fonte: Saaty (1980).

Na matriz de comparação, as posições da diagonal serão sempre iguais a 1, tendo em vista que um elemento é igualmente importante com relação a si próprio. Para preencher os demais elementos da matriz, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância de acordo com a escala adaptada de Saaty (1980) para o método AHP (Tabela 1). Para as comparações inversas, isto é, na parte inferior esquerda da matriz, são utilizados os valores recíprocos da parte superior direita da mesma, pois Saaty parte do pressuposto de que as comparações estabelecidas obedecem ao princípio da reciprocidade, isto é, se A é 6 vezes mais importante do que B , B será $1/6$ mais importante do que A . Construída a matriz de decisão, a obtenção dos pesos de cada variável, é baseada no auto vetor *Eigen* (SAATY, 1980).

Por fim, o método AHP utiliza-se da análise de consistência lógica que verifica a consistência ou validade da coerência nas comparações elaboradas pelo especialista. A inconsistência pode surgir quando algumas comparações se contradizem umas com as outras, desta forma, o método AHP se propõe a calcular a taxa ou razão de consistência (RC) dos julgamentos, que é representada pela Equação 1.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (1)$$

Onde IR = índice de consistência randômico, obtido para uma matriz recíproca de ordem n, com elementos não negativos, este fator é gerado randomicamente e está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Índices de consistência randômica (IR)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Saaty (1980).

E, o índice de consistência (IC) é dado pela Equação 2:

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (2)$$

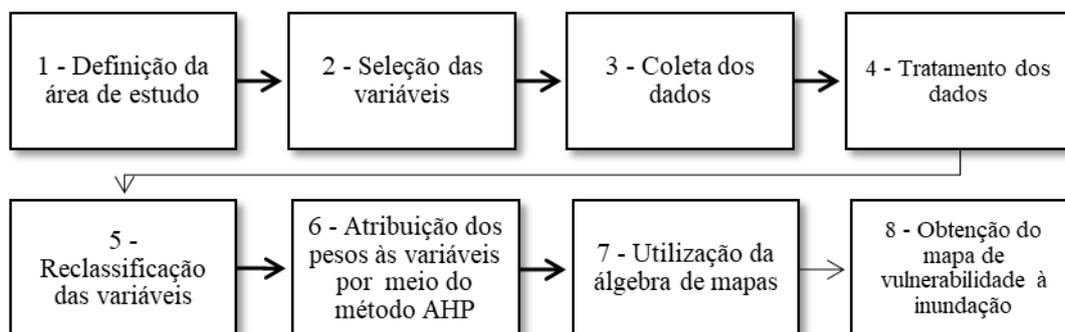
Onde: $\lambda_{m\acute{a}x}$ = maior valor de autovetor da matriz de julgamentos. n = número de ordem da matriz.

De acordo com Saaty (1980), caso o IC (índice de consistência) obtido seja menor ou igual a 10% os julgamos consistentes, caso contrário não são. Nesse último caso, pode-se refazer os julgamentos junto ao especialista ou utilizar algoritmos para criação de matrizes filhas, semelhantes a matriz mãe, por meio de iterações até que elas apresentem grau de consistência menor ou igual a 10%.

3 METODOLOGIA

Buscando atingir os objetivos elencados, esse trabalho foi estruturado em um conjunto de etapas, como ilustrado na Figura 2. A seguir cada uma será descrita.

Figura 2 - Etapas metodológicas utilizadas no trabalho



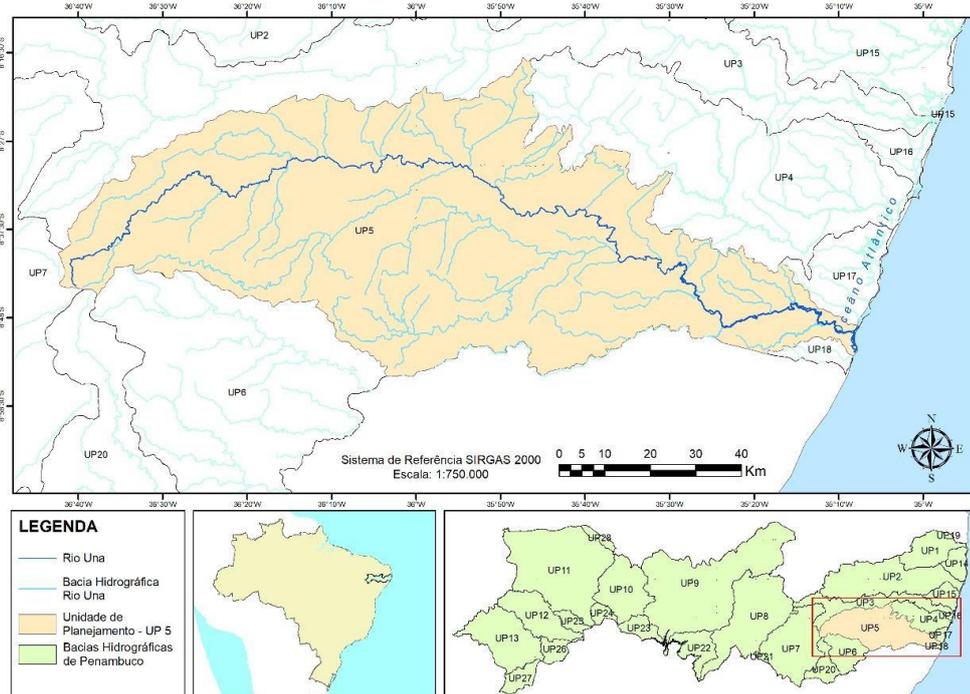
Fonte: A autora (2019).

3.1 Definição da área de estudo

Segundo dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), a Unidade de Planejamento Hídrico UP5, que corresponde à bacia hidrográfica do rio Una, está localizada no sul do litoral do Estado de Pernambuco, entre 08°17'14" e 08°55'28" de latitude sul, e 35°07'48" e 36°42'10" de longitude oeste conforme mostra o Mapa 1.

A nascente do rio Una se localiza no município de Capoeiras, apresentando-se intermitente até aproximadamente à cidade de Altinho, quando se torna perene. Possui uma extensão de cerca de 290 km, tendo como principais afluentes, pela margem direita, riacho Quatis, rio da Chata, rio Pirangi, rio Jacuípe e rio Caraçu. A bacia do rio Una apresenta uma área de 6.740,31 km², dos quais 6.262,78 km² estão inseridos no estado de Pernambuco, correspondendo a 6,37 % do total do estado.

Mapa 1 - Mapa da bacia hidrográfica do rio Una - PE



Fonte: A autora (2019).

A referida bacia abrange 42 municípios, dos quais 11 estão totalmente inseridos na bacia (Belém de Maria, Catende, Cupira, Ibarajuba, Jaqueira, Lagoa dos Gatos, Maraial, Palmares, Panelas, São Benedito do Sul e Xexéu), 15 possuem sede inserida na bacia (Água Preta, Agrestina, Altinho, Barreiros, Bonito, Cachoeirinha, Calçado, Capoeiras, Jucati, Jupi, Jurema, Lajedo, Quipapá, São Bento do Una e São Joaquim do Monte), e 16 estão parcialmente inseridos (Barra de Guabiraba, Bezerros, Caetés, Camocim de São Félix, Canhotinho, Caruaru, Gameleira, Joaquim Nabuco, Pesqueira, Rio Formoso, Sanharó, São Caetano, São José da Coroa Grande, Tacaimbó, Tamandaré e Venturosa).

Monteiro et al. (2014) procedeu a realização de uma caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Una, a partir da análise de alguns parâmetros físicos, sendo estes o coeficiente de compacidade, fator de forma e índice de circularidade, no intuito de definir o nível de susceptibilidade à enchentes da bacia. Entretanto, com os resultados obtidos o autor concluiu que a bacia hidrográfica do rio Una quando em condições normais de precipitação, ou seja, excluindo-se eventos extremos e anormais apresenta-se pouco suscetível a enchentes. Esta afirmativa se

alicerça nos dados encontrados, onde o coeficiente de compacidade apresenta valor afastado da unidade (2,12792) e o fator de forma exibe um valor baixo (0,220461).

A escolha desta bacia se deu em função principalmente dos frequentes eventos que ocorreram nesta última década provocando uma grande incidência de inundações, e por grande porcentagem da população desta bacia estar concentrada nas áreas ribeirinhas que são indícios de que existe a necessidade de estudos e de aplicações de medidas convencionais e não convencionais por parte dos setores públicos de administração e planejamento.

3.2 Seleção das variáveis

No tocante ao mapeamento do risco à inundação, a literatura elenca diversas variáveis impactantes a serem consideradas nesse estudo, de modo que, a probabilidade da ocorrência de inundação, enchente e de alagamento são resultados da combinação entre os condicionantes naturais e antrópicos.

Sob a ótica de Magalhães et al. (2011) a definição dos tipos de solo existentes na região é importante, pois cada um deles possui diferentes capacidades de infiltração e escoamento superficial da água.

Ainda de acordo com Magalhães et al. (2011), a altitude influencia no risco a inundação devido à ação da lei da gravidade que direciona a água para as regiões mais baixas, assim como a declividade é fator crucial na determinação dos riscos de inundação de uma área, pois, influencia diretamente no acúmulo de água no terreno. Dessa forma, áreas planas apresentam maiores probabilidades de sofrer inundação do que áreas escarpadas.

Além disso, as áreas com maior impermeabilidade tendem a acumular mais água em superfície do que em solos com cobertura florestal por serem pouco compactados; assim, áreas impermeáveis contribuem também para o “aumento da velocidade e do volume de escoamento superficial das águas urbanas; aumento do número e da frequência das inundações; incremento da poluição difusa pela lavagem das superfícies urbanizadas (REZENDE et al., 2017).

Percebe-se, portanto, que o indicador de uso e ocupação do solo é dinâmico e imprescindível para demonstrar de que maneira o espaço foi ocupado pelo homem e a interferência nos mecanismos de infiltração e escoamento superficial da água no terreno.

A seleção das variáveis para o presente estudo se deu com base na revisão de literatura, conforme sintetizado no Quadro 2, sendo as variáveis mais citadas como propulsoras à inundação da bacia: a altitude, a tipologia do solo, o uso e ocupação dados a ele e a declividade do terreno.

Quadro 2 - Revisão de literatura das principais variáveis impactantes na inundação

Variáveis	Autores					
	Magalhães et al. (2011)	Borges et al. (2015)	Miranda (2016)	Santos e Ventorini (2017)	Rezende et al. (2017)	Campioli e Vieira (2019)
Declividade	•	•	•	•	•	•
Tipo do Solo		•	•		•	•
Uso e ocupação do solo	•	•	•	•	•	•
Altitude	•	•	•	•	•	•
Proximidade superfícies líquidas				•		
Geologia			•			•

Fonte: A autora (2019).

Tais variáveis ajudam a entender a dinâmica dos processos ambientais na área de estudo quando se observa sua contribuição para a ocorrência ou não de inundação. Segundo Miranda (2016) as inundações são resultado da combinação entre chuvas intensas ou de longa duração e as características físicas da bacia hidrográfica.

3.3 Coleta de dados

Os dados para a realização do presente estudo foram obtidos de plataformas virtuais de órgãos governamentais, conforme indicado no Quadro 3.

Quadro 3 - Fontes dos dados utilizados

Dado	Tipo	Origem	Ano
Municípios	Vetorial (polígono)	IBGE	2010
Delimitação da BH	Vetorial (polígono)	IBGE	2010
Hidrografia	Vetorial (linha)	IBGE	2010
Declividade	Raster	INPE (TOPODATA)	2008
Altitude	Vetorial (polígono)	MMA	2005
Tipo do solo	Vetorial (polígono)	IBGE/EMBRAPA	2011
Uso e ocupação do solo	Raster	IBGE (MAPBIOMAS)	2010

Fonte: A autora (2019).

3.4 Tratamento dos dados

Para a elaboração de uma base de dados que permita utilizar a análise multicritério, inicialmente é necessário que os mapas em formato vetorial (*shapefile*) sejam transformados para o formato matricial (*raster*) (MOURA, 2007).

Todos os dados foram organizados num BDG, foram tratados através do software *ArcGis® 10.3 for Desktop* da empresa americana *Esri (Environmental Systems Research Institute)* e projetados para um sistema de coordenadas geográficas e datum SIRGAS 2000.

3.5 Reclassificação das variáveis

A metodologia utilizada para a reclassificação das variáveis foi adaptada da proposta por Ross (1994), que definiu uma hierarquia de acordo com o grau de vulnerabilidade para cada classe de cada variável, de forma que quanto maior o valor atribuído à classe, maior o grau. Sendo o grau 1 (muito fraca), grau 2 (fraca), grau 3 (média), grau 4 (forte) e grau 5 (muito forte).

Com base nos estudos de Campioli e Vieira (2019), Magalhães et al. (2011), Borges et al. (2015), Miranda (2016), Santos e Ventorini (2017) e Rezende et al. (2017) foram realizadas as seguintes reclassificações para cada variável escolhida (Quadro 4). A atribuição do valor zero à uma classe se deu para exclusão da mesma da álgebra de mapas.

Quadro 4 - Reclassificação dos valores das classes das variáveis, segundo o grau de vulnerabilidade

Grau	Variáveis			
	Uso e ocupação do solo	Hipsometria (m)	Declividade (m/m)	Pedologia
0	Não observado	-	-	-
1	Floresta	Acima 800 500-800	Escarpado (>75%) Montanhoso (45-75%)	Latossolos
2	Formação natural não florestal	400-500	Forte ondulado (20-45%)	Neossolos (Regossolos e Litólicos)
3	Uso agropecuário	200-400	Ondulado (8-20%)	-
4	Infraestrutura Urbana	100-200	Suave ondulado (3-8%)	Argissolos (Podzólicos)
5	Corpos d'água	0 a100	Plano (0-3%)	Planossolos

Fonte: A autora (2019).

3.6 Atribuição de pesos às variáveis

Seguidamente ao processo de coleta, tratamento dos dados, e reclassificação das variáveis, a matriz para obtenção dos pesos das variáveis analisadas foi construída junto ao especialista na temática estudada, conforme Tabela 2.

Para obtenção dos pesos das variáveis, o método AHP foi aplicado junto a um especialista em recursos hídricos, com formação técnica e experiência na área. Deste modo, foi solicitado ao especialista realizar comparação pareada respondendo à seguinte pergunta: “qual o grau de importância da variável A sobre a variável B? E em qual proporção (usando a escala da Tabela 1)?”. Assim, foi possível a obtenção dos pesos para as quatro variáveis utilizadas nesse trabalho.

Tabela 2 - Matriz de decisão para obtenção dos pesos das variáveis

Variáveis	Solo	Uso do solo	Altitude	Declividade
Solo	1	1/3	1/5	1/7
Uso do solo	3	1	1/3	1/5
Altitude	5	3	1	1/3
Declividade	7	5	3	1

Fonte: A autora (2019).

3.7 Álgebra de Mapas

A elaboração do mapa de interesse se deu por meio da associação das camadas de informações, representando as variáveis, realizada por um SIG, conforme exposto na Equação 3.

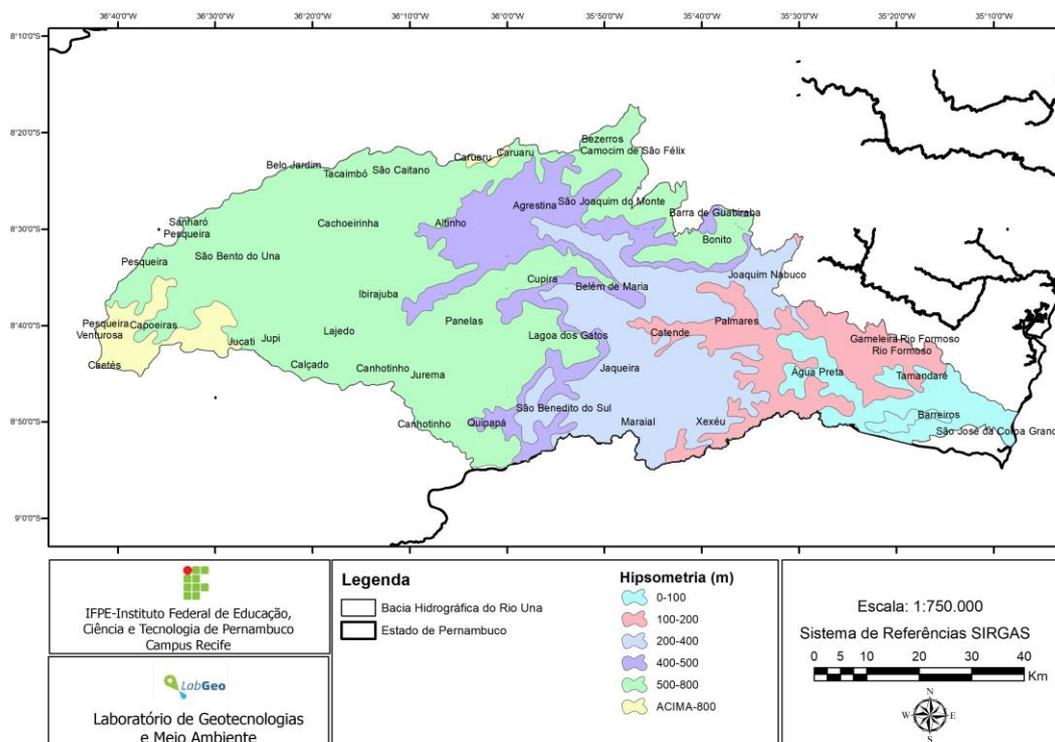
$$M = Pa * A + Ps * S + Pd * D + Pu * U \quad (3)$$

Onde: M = Mapa final; A = Altitude; S = Solos; D = Declividade; U = Uso e ocupação; Pi = Peso da respectiva variável.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Como resultado da coleta e tratamento de dados, as variáveis foram expressas em camadas de informações. O Mapa 2 apresenta o intervalo de altitudes identificado na bacia.

Mapa 2 - Mapa da hipsometria da bacia hidrográfica do rio Una

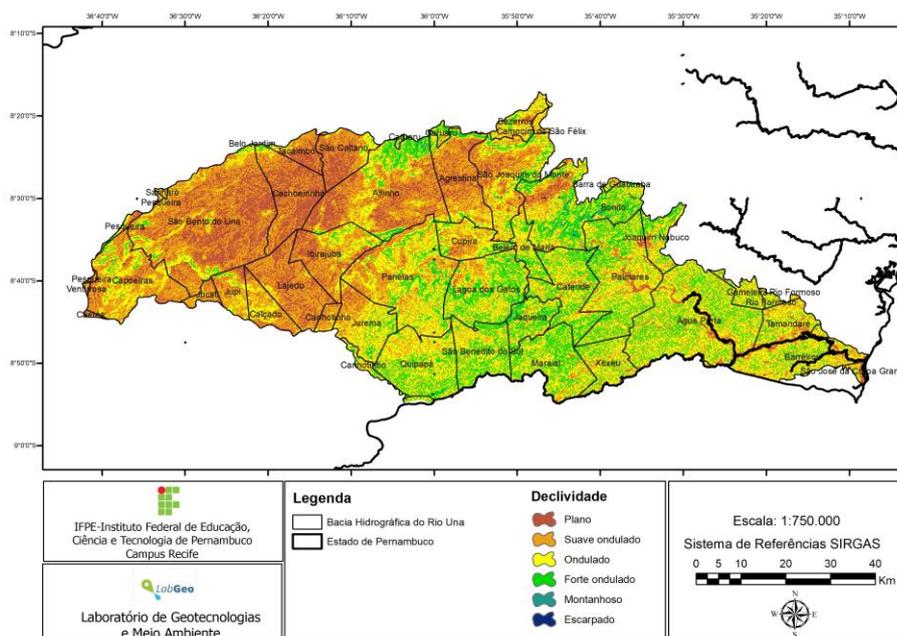


Fonte: A autora (2019).

As classes de declividade, apresentadas no Mapa 3, são assim descritas segundo a EMBRAPA (2006):

- Plano (0 - 3%): superfície de topografia lisa ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos.
- Suave ondulado (3 - 8%): superfície de topografia ligeiramente movimentada, constituída por conjunto de pequenas colinas ou outeiros, ou sucessão de pequenos vales pouco encaixados (rasos).
- Ondulado (8 - 20%): superfície de topografia relativamente movimentada, constituída por conjunto de medianas colinas e outeiros, ou por interflúvios de pendentes curtas, formadas por vales encaixados, configurando em todos os casos, pendentes ou encostas com declives maiores.
- Forte Ondulado (20 - 45%): superfície de topografia movimentada, com desníveis fortes, formadas por conjunto de outeiros ou morros, ou por superfície entrecortada por vales profundos, configurando encostas ou pendentes.
- Montanhoso (45 - 75%): superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos, montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes ou muito fortes.
- Escarpado (> 75%): áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuestras, falésias e vertentes de declives muito fortes (EMBRAPA, 2006).

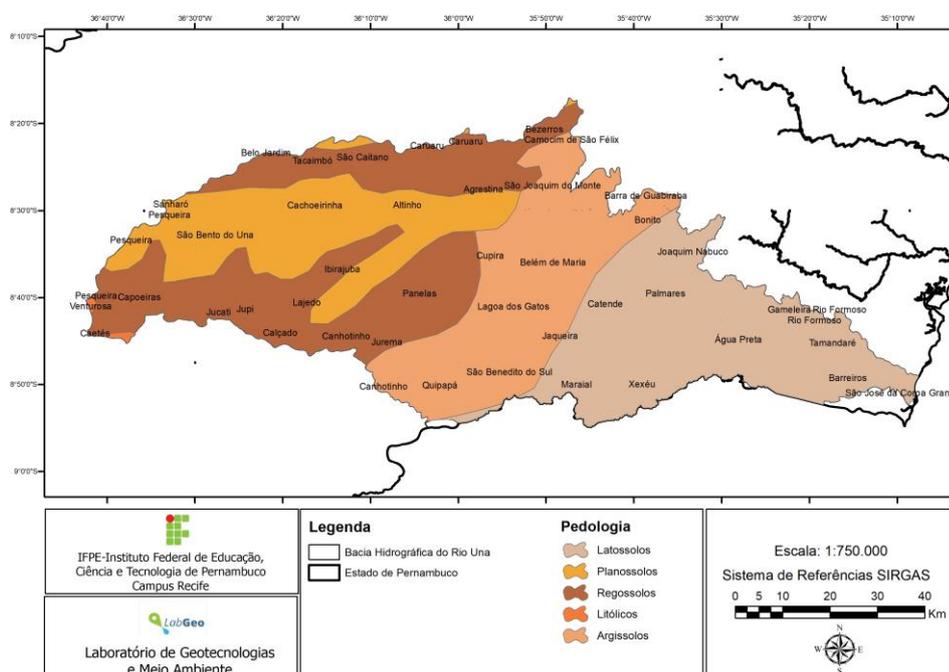
Mapa 3 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: A autora (2019).

Já com relação ao tipo do solo encontrados na bacia expressos no Mapa 4, conforme consta no Manual Técnico de Pedologia do IBGE (2007), os latossolos são solos profundos e bem drenados, já os planossolos são definidos como imperfeitamente ou mal drenados, os demais tipos percorrem pelas características desses dois extremos. Além disso, os solos compostos por sedimentos finos (silte e argila), bem como os solos compactados superficialmente, produzem maior escoamento superficial.

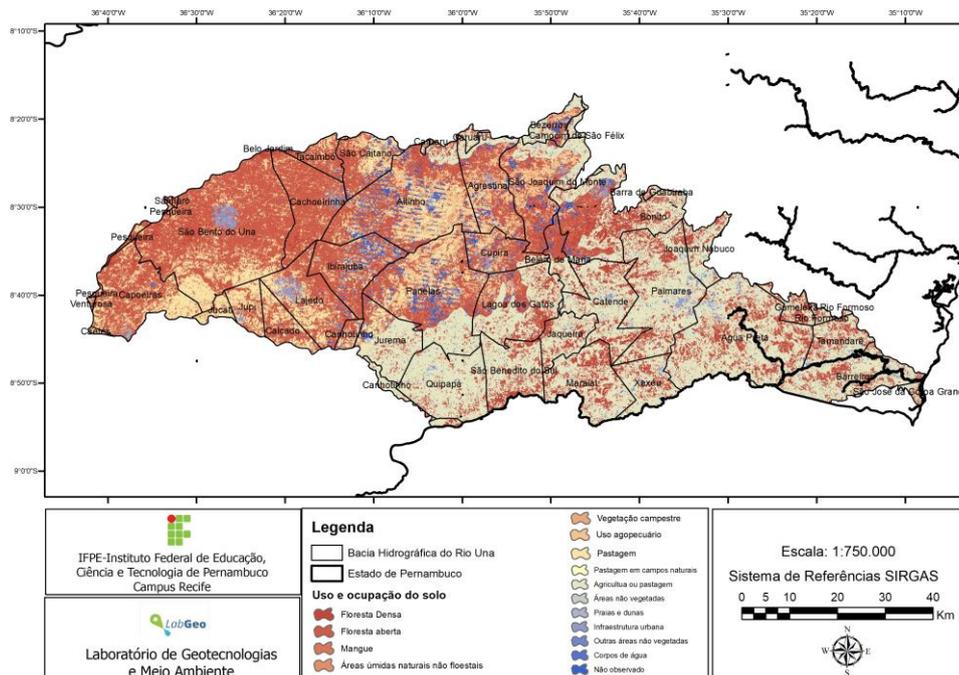
Mapa 4 - Mapa de pedologia da bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: A autora (2019).

A partir do mapeamento do uso e conservação das terras expresso no Mapa 5 pode-se perceber que a bacia hidrográfica contempla tanto áreas de vegetação densa quanto áreas de solo exposto por situar-se na faixa de transição entre os biomas da mata atlântica e caatinga.

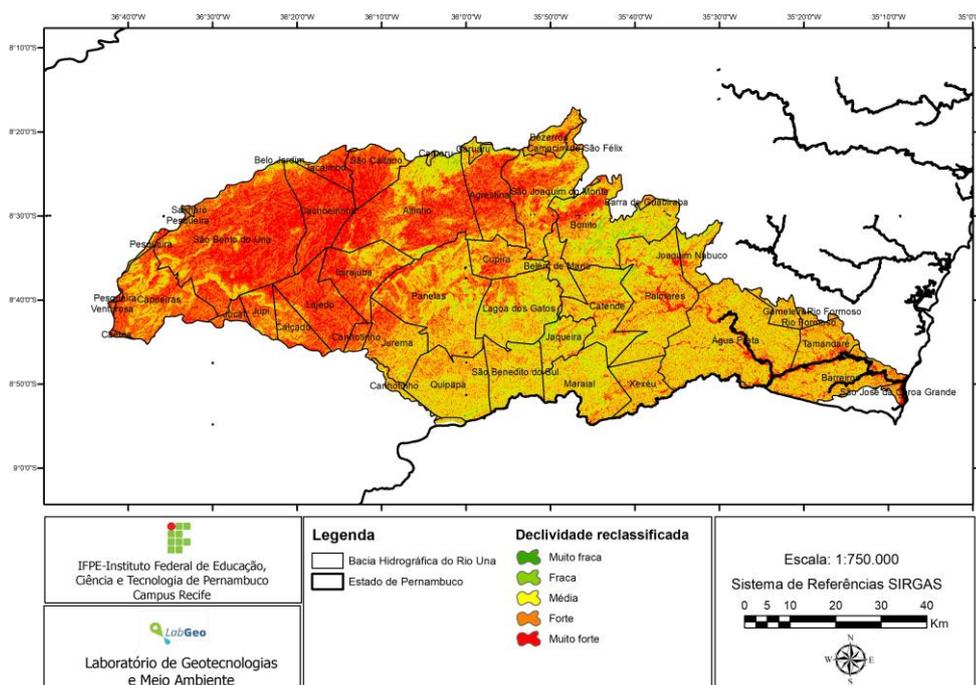
Mapa 5 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: A autora (2019).

Dando prosseguimento à metodologia adotada, as reclassificações das variáveis foram realizadas com base em Rezende et al. (2017) que utilizou em seu estudo notas maiores para áreas com menores valores de altitude, o que influencia o risco de inundação pelo acúmulo de água decorrente. Já as menores notas referem-se às áreas com maior altitude e, por tais características, menos sujeitas à inundação. Assim, se analisada a variável hipsométrica separadamente, a bacia apresentou tendência à inundação na sua porção sudeste, conforme mostra o Mapa 6.

Mapa 7 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Una reclassificado



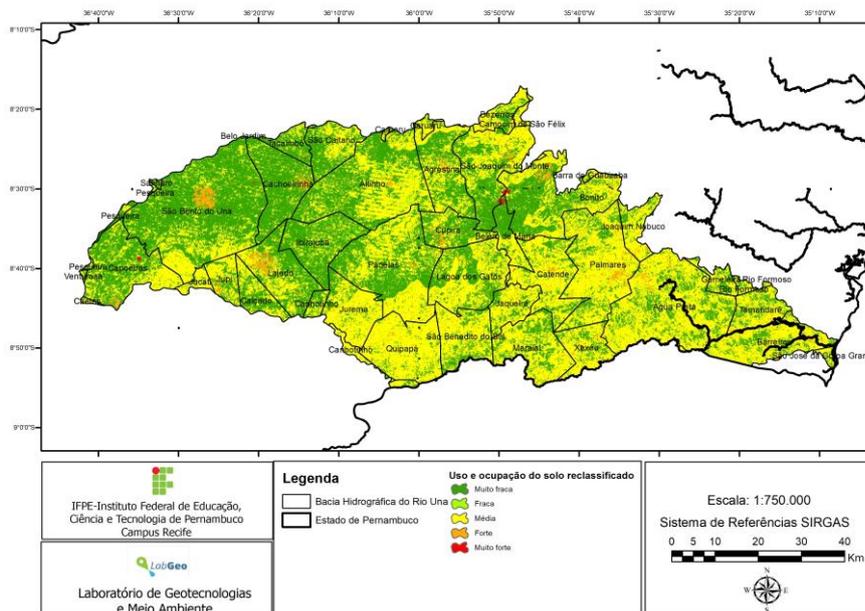
Fonte: A autora (2019).

Rezende et al. (2017) afirma que a existência de baixos valores associados à altitude e declividade contribui para a possibilidade de ocorrerem processos erosivos, enchentes e inundações.

Para as notas das classes de uso e conservação das terras foram adotadas valores máximos para as áreas impermeáveis ou que se apresentam periodicamente alagadas e notas mínimas para as áreas permeáveis segundo a ótica de Miranda (2016), conforme mostra o Mapa 8.

As enchentes são potencialmente ampliadas pela urbanização, especialmente devido à impermeabilização dos solos. Deste modo a identificação das formas de ocupação do solo da bacia e sua mensuração é tarefa importante. A perda de cobertura vegetal para uso agrícola e urbano tem produzido como consequência o aumento da frequência de inundações devido à falta de interceptação da precipitação (CAMPIOLI; VIEIRA, 2019).

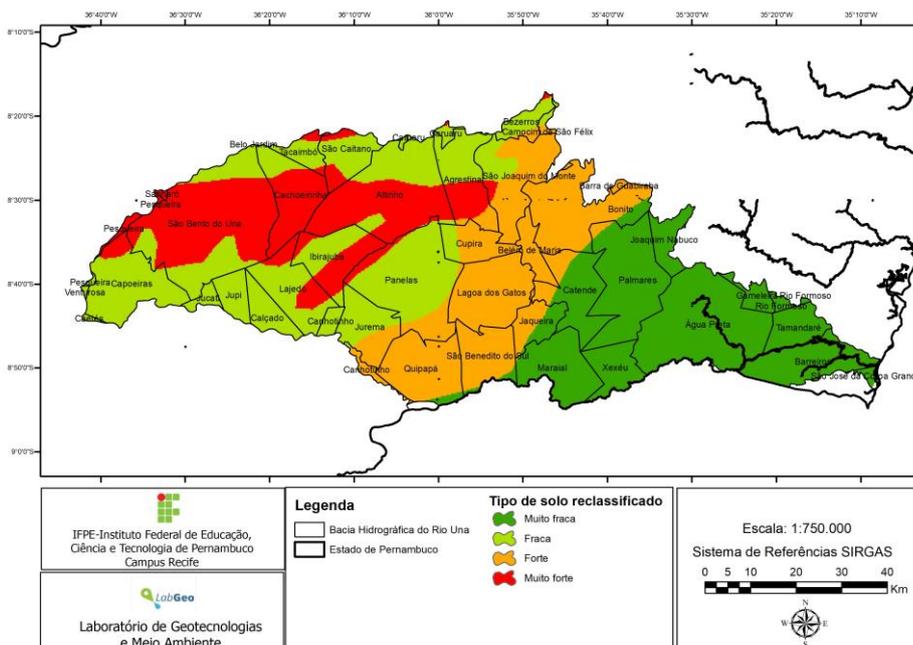
Mapa 8 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Una reclassificado



Fonte: A autora (2019).

De modo semelhante, para a variável pedológica, foram atribuídas notas menores para os solos bem drenados, e notas maiores para os solos mal drenados e argilosos por apresentarem baixa permeabilidade, conforme exposto no Mapa 9.

Mapa 9 - Mapa de pedologia da bacia hidrográfica do rio Una reclassificado



Fonte: A autora (2019).

Após a obtenção do auto vetor de *Eingen*, na matriz de decisão, com o auxílio do *software Microsoft Excel*, obteve-se os seguintes pesos para as variáveis segundo a Tabela 3, explicitando claramente a lógica do ciclo hidrológico:

Tabela 3 - Pesos obtidos para as variáveis

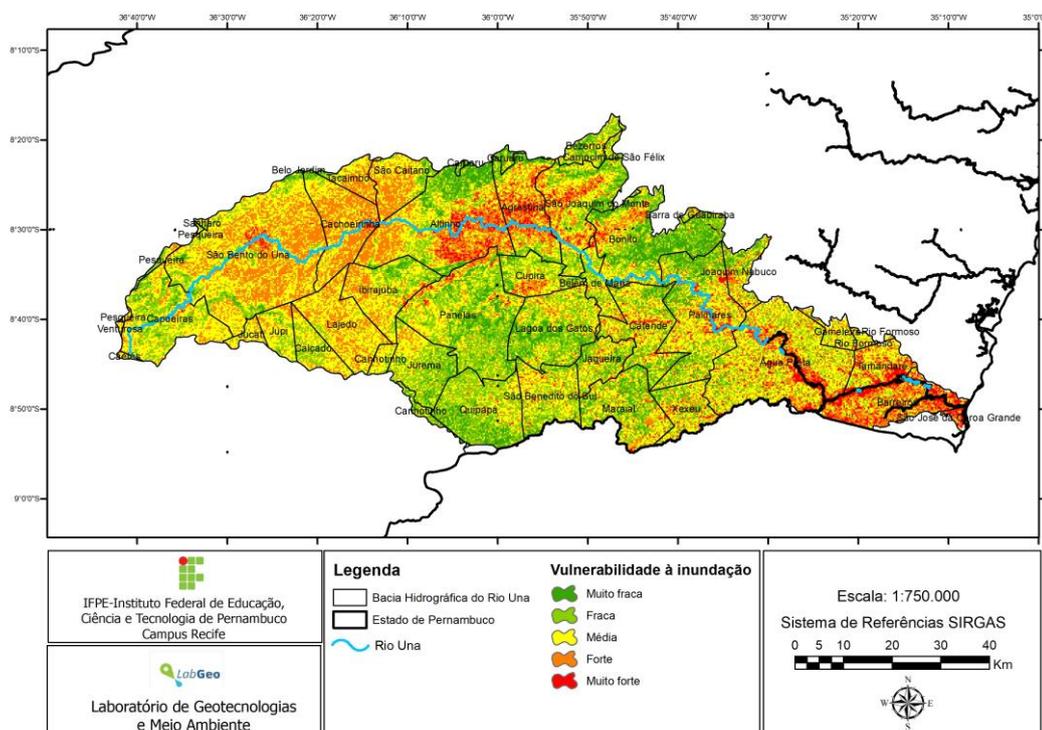
Variáveis	Pesos
Declividade	0,557
Altitude	0,264
Uso do solo	0,122
Solo	0,057

Fonte: A autora (2019).

Ademais obteve-se um RC de 6,5436%, como o valor é menor do que 10%, logo segundo Saaty (1980) a matriz é consistente e os pesos obtidos são válidos.

Por meio da técnica da análise multicritério, foi realizada a álgebra dos mapas hipsométrico, declividade, pedológico e de uso da terra, resultando em um modelo-síntese das áreas com potencial para ocorrência de enchentes e inundações conforme exposto no Mapa 10.

Mapa 10 - Mapa de vulnerabilidade à inundações na bacia hidrográfica do rio Una-PE

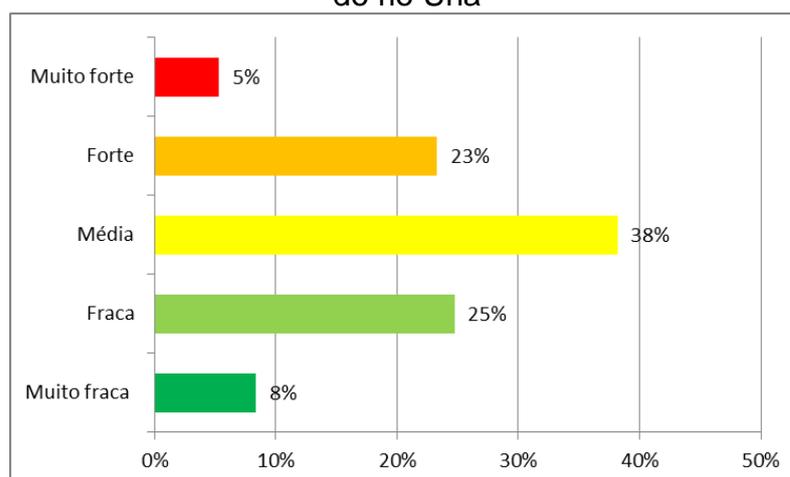


Fonte: A autora (2019).

É notório que as áreas consideradas como de risco muito alto estão concentradas principalmente nas regiões mais baixas da bacia, claramente o local do exutório. Os valores são explicados justamente por esses níveis de informação apresentarem a maior importância de acordo com a matriz de comparação pareada, enquanto que as zonas de baixo grau de risco localizam-se na porção mais elevada da bacia.

Analisando a área da bacia como um todo, pode-se observar que as categorias de vulnerabilidade média, seguida da vulnerabilidade fraca, mostraram-se dominantes, representando, respectivamente, 38% e 25% da área total mapeada como ilustrado na Figura 3, mostrando que no geral a bacia não teria forte tendência à ser inundada.

Figura 3 - Percentuais das áreas de vulneráveis à inundação na bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: A autora (2019).

A área com vulnerabilidade muito forte foi pouco expressiva, contemplando apenas 5% da área total, mas por serem áreas específicas existentes em alguns municípios já evidenciavam a necessidade de atenção especial. Analisando a Tabela 4, decorrente da contagem de *pixels*, Barreiros foi o município que se apresentou como na situação mais desfavorável somando mais de 70% de sua área na categoria de vulnerabilidade forte e muito forte à inundação.

Tabela 4 - Percentuais de área por grau de vulnerabilidade em municípios da bacia hidrográfica do rio Una

Município	Grau de vulnerabilidade				
	Muito fraca	Fraca	Média	Forte	Muito forte
Agrestina	6%	14%	30%	36%	15%
Água preta	1%	20%	44%	23%	13%
Altinho	11%	17%	29%	33%	10%
Barreiros	-	5%	20%	41%	34%
Catende	10%	33%	39%	15%	4%
Palmares	12%	28%	37%	17%	7%

Fonte: A autora (2019).

Aliado a isso, a concentração de tais áreas com forte vulnerabilidade à inundação coincidiram exatamente com municípios afetados pelas inundações bruscas em Pernambuco, em Junho de 2010, relatados no Relatório de Avaliação de Perdas e Danos do Banco Mundial (2012) conforme expõe-se no Quadro 5, evidenciando a eficácia do método AHP, utilizado para a atribuição de pesos das classes contribuintes para a vulnerabilidade à inundação do presente estudo, garantindo assim a veracidade dos julgamentos.

Quadro 5 - Municípios atingidos por inundações bruscas em Pernambuco no ano de 2010

Municípios em estado de calamidade pública	Municípios em situação de emergência	Municípios afetados
Barra de Guabiraba	Agrestina	Abreu e Lima
Correntes	Altinho	Aliança
Água Preta	Amaraji	Angelim
Catende	Belém de Maria	Araçoiaba
Cortês	Bezerros	Belo Jardim
Jaqueira	Bom conselho	Brejão
Maraial	Bonito	Canhotinho
Palmares	Cabo de Santo Agostinho	Iati
Primavera	Cachoeirinha	Ibirajuba
São Benedito do Sul	Caetés	Igarassu
Vitória de Santo Antão	Camaraigibe	Ilha de Itamaracá
Barreiros	Chã Grande	João Alfredo
-	Escada	Lagoa dos Matos
-	Gameleira	Limoeiro
-	Gravatá	Olinda
-	Ipojuca	Panelas
-	Jaboatão dos Guararapes	Passira
-	Joaquim Nabuco	Paudalho

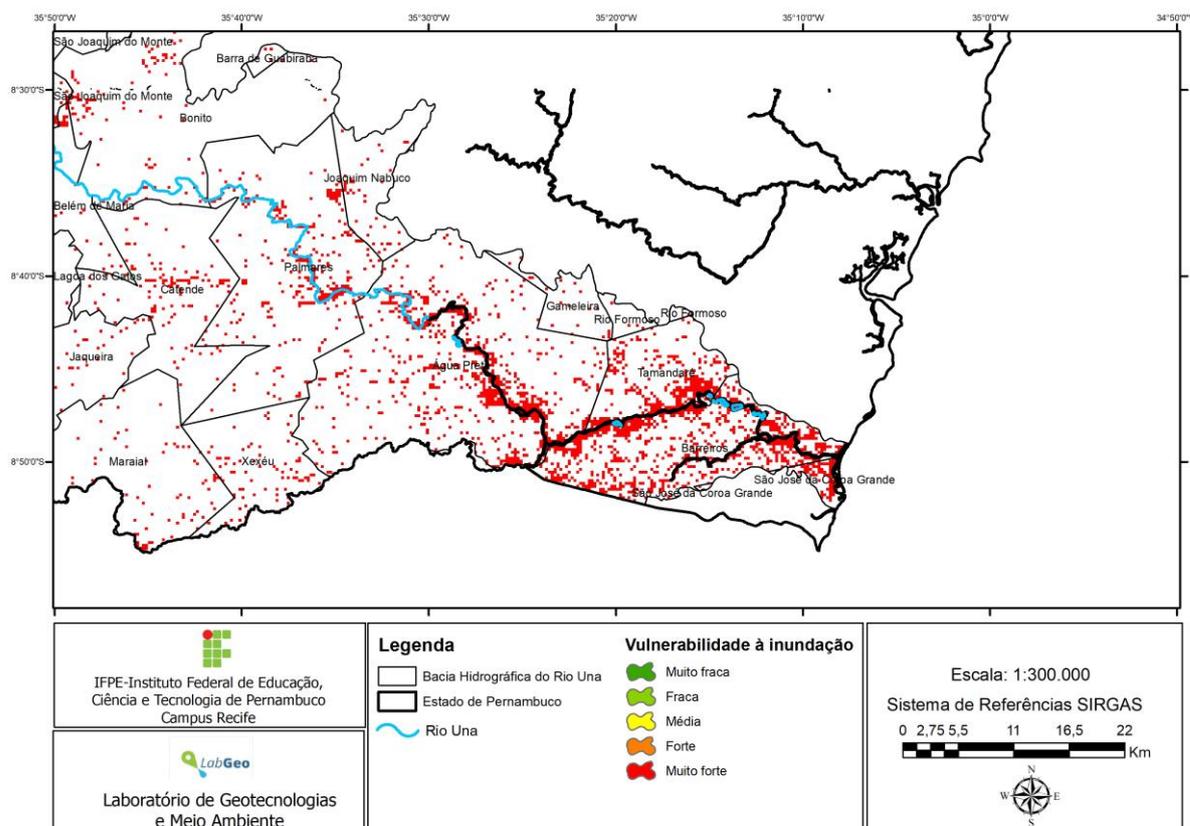
Instituto Federal de Pernambuco. Campus Recife. Curso de Graduação em Engenharia Civil. 14 de agosto de 2019.

Municípios em estado de calamidade pública	Municípios em situação de emergência	Municípios afetados
-	Jurema	Paulista
-	Moreno	Recife
-	Nazaré da Mata	Rio Formoso
-	Palmeirinha	Salgadinho
-	Pombos	São João
-	Quipapá	São Lourenço da Mata
-	Ribeirão	São Vicente Ferrer
-	São Joaquim do Monte	Terezinha
-	Sirinhaém	-
-	Tamandaré	-
-	Vicência	-

Fonte: Banco Mundial (2012).

Além da questão anterior, a consideração da proximidade dos cursos d'água também foi fator relevante conforme abordado por Santos e Ventorini (2017). No trecho sudeste da bacia, houve uma concentração de pontos com vulnerabilidade muito forte no decorrer das margens do rio Una, conforme apresentado no Mapa 11.

Mapa 11 - Mapa de vulnerabilidade muito forte à inundação na bacia hidrográfica do rio Una-PE



Fonte: A autora (2019).

Em Minas Gerais, Rezende et al. (2017) procedeu, de forma análoga, o mapeamento da vulnerabilidade à inundação no perímetro urbano da cidade de Paracatu, levando em consideração as mesmas variáveis e pesos desse estudo, chegando à detecção de números expressivos: 36% da área de estudo encontrava-se na classe alto risco de inundação, seguida pelas classes médio risco (26%) e muito alto risco (25%).

Em Joinville-Santa Catarina, Campioli e Vieira (2019) em seu estudo de caso relacionado ao mapeamento de suscetibilidade a inundação na bacia hidrográfica do rio Cubatão do Norte também utilizando o método AHP e indicou que as regiões de menor vulnerabilidade representavam cerca de 94% da bacia e são identificadas por zonas compostas por áreas protegidas ambientalmente e de grande restrição de uso e as áreas de maior exposição estão inseridas nas áreas de menor altitude, nas proximidades da foz da bacia hidrográfica, resultados estes similares ao do presente estudo.

Abarcando o conceito de Tucci (2001), medidas estruturais são obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes agindo na bacia (extensivas), ou mesmo no rio (intensivas).

Medidas não estruturais podem ser implementadas por meio de inserção de normas, regulamentos, programas e a fiscalização do processo de urbanização a fim de se garantir que a Lei de Uso e Ocupação do solo Urbano seja cumprida pelos cidadãos, assegurando desta forma a proteção das áreas inundáveis e de Preservação Permanente (APP) (MIRANDA, 2016).

Apesar disso, Tucci (2001) orienta que as medidas estruturais não são projetadas para dar uma proteção completa, as medidas não estruturais, em conjunto com as anteriores ou sem essas podem minimizar significativamente os prejuízos com um menor custo.

Tucci (2001) ainda alerta que para regulamentar o uso da terra ou zoneamento de áreas inundáveis é necessário estabelecer o risco de inundação das diferentes cotas das áreas ribeirinhas, exatamente onde se enquadra a contribuição do presente estudo.

Vale salientar que nas áreas de forte vulnerabilidade não é permitida a habitação e devem ser utilizadas com altíssimas limitações, enquanto que nas áreas de vulnerabilidade muito forte recomenda-se a recuperação e conservação imediatas

tendo como principal objetivo a contenção do processo de inundação, uso adequado do solo e a preservação ambiental das áreas em questão. Já as áreas de vulnerabilidade fraca e média terão que ser tomados os devidos cuidados quanto ao seu uso para que esse grau de vulnerabilidade não aumente.

O plano diretor de drenagem urbana e o planejamento das áreas de risco devem ser estabelecidos, pois através deles são designadas medidas de controle como zoneamento e o uso e ocupação do solo, além de obras de drenagem a fim de controlar o escoamento superficial, minimizando assim os danos causados pelos fenômenos decorrentes da urbanização (BORGES et al., 2015).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as técnicas disponíveis para avaliação da inundação, o referido trabalho apresentou uma metodologia que se utilizou de um SIG. O uso dos recursos do SIG destacou-se como uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento da pesquisa, visto que, através dele foi possível obter mapas, assim como manipular, sobrepor variáveis, analisar e apresentar um mapa de vulnerabilidade como produto final.

A análise multicritério permitiu a investigação combinada de variáveis, e associada com o método de álgebra de mapas, permitiu caracterizar, agrupar e classificar áreas que apresentaram potencial de inundação semelhante, e dessa forma, possibilitar análises comparativas diversas, proporcionando uma visualização menos complexa da realidade.

O uso do AHP, por sua vez, proporcionou uma análise mais robusta, ao elencar pesos atribuídos às variáveis com base no conhecimento do especialista. Assim, a sua incorporação na análise proporcionou uma maior efetividade na ponderação das variáveis na álgebra de mapas, havendo um melhor ajustamento da importância das variáveis na localidade em questão.

Com bases nas respostas obtidas neste estudo, entende-se que o mapa de vulnerabilidade poderá servir de instrumento para eleger áreas prioritárias de investimentos, bem como direcionar ações e programas de governo de planejamento e gestão ambiental, assim como a implementação de políticas públicas no combate aos fatores naturais e antrópicos que ocasionam a inundação nas bacias hidrográficas.

Em estudos futuros, espera-se que outras variáveis sejam incorporadas na análise. Sob o ponto de vista da modelagem, dada a complexidade do problema em questão e da interveniência das variáveis e, sobretudo, no contexto dos desastres naturais o risco envolver incertezas, um modelo multicritério *fuzzy* espacial pode ser construído, visando incorporar a incerteza inerente aos processos ambientais e antrópicos, integrando as técnicas de geoprocessamento com os métodos multicritério, a partir de dados *fuzzyificados*.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC (Pernambuco). Recife: APAC, 2019. **Bacia do Rio Una**. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=23. Acesso em 22 abr. 2019.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de perdas e danos: inundações bruscas em Pernambuco** - Junho de 2010. Brasília, 2012.

BORGES, M. P.; CRUVINEL, A. S.; FLORES, W. M. F.; BARBOSA, G. R. Utilização de técnicas de geoprocessamento para a elaboração de cotas de inundações: estudo de caso do parque ecológico do rio Paranaíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais ...** João Pessoa: SBSR, 2015. p. 5897- 5903.

BRASIL. **Lei nº 12608, de 10 de abril de 2012**. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - Pnpdec. Brasília, DF: Presidência da República, [2012]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acesso em: 2 jun. 2019.

CAMPIOLI, P. F.; VIEIRA, C. V. Avaliação do Risco a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 01, 2019, p. 124-138.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10. 2006, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro, 2006. 83 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (Brasil). **Manual Técnico de Pedologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em: <http://www.agrolink.com.br/downloads/manual%20t%C3%A9cnico%20de%20pedologia.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2019.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

Instituto Federal de Pernambuco. Campus Recife. Curso de Graduação em Engenharia Civil. 14 de agosto de 2019.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociência**, v. 8, n. 2, 2011, p. 63-70.

MIRANDA, N. M. G. **Análise espacial da suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do ribeirão do Ipa-Cuiabá-MT**. 2016. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MONTEIRO, K. A.; BARROS, A. C. M.; MELO, R. F. T.; RAMOS, D. A. M. C.; NÓBREGA, R. S.; GIRÃO, O. Parâmetros morfométricos aplicados à bacia do rio Una (Pernambuco-Brasil) para identificar susceptibilidade a enchentes. **Revista Geográfica de América Central**, v. 1, n. 52, 2014, p. 163-177.

MOURA, A. C. M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2899-2906.

SANTOS, T. G.; VENTORINI, S. E. Mapeamento digital das áreas propícias às enchentes e inundações na bacia do Córrego do Lenheiro em São João del-Rei-MG. **PerCursos**, v. 18, n. 36, 2017, p. 95-124.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. Construção de modelo no Qgis e utilização do método de processo analítico hierárquico–AHP para mapeamento de riscos à inundação na área urbana de Paracatu–MG. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 61, 2017, p. 01-18.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, n.1, 1994, p. 63-74.

TOMINAGA, L. K. Desastres naturais: por que ocorrem? In: TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela (Orgs.). **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads>. Acesso em: 25 mar. 2019.

TUCCI, C, E, M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Editora da UFRGS/ Coleção ABRH, v. 4, 2001. 943 p.

TUCCI, C, E, M; BERTONI, J, C (orgs). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. Disponível em: <http://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/InBr02803.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.