



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE GEOGRAFIA, DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**ANDERSON DOS SANTOS RAMOS**

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DO MÉTODO AHP, PARA MAPEAMENTO DE  
VULNERABILIDADE A INUNDAÇÕES, NA BACIA DO RIO MUNDAÚ, EM  
ALAGOAS**

**Maceió, Alagoas**

**2021**

**ANDERSON DOS SANTOS RAMOS**

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DO MÉTODO AHP, PARA MAPEAMENTO DE  
VULNERABILIDADE A INUNDAÇÕES, NA BACIA DO RIO MUNDAÚ, EM  
ALAGOAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Alagoas, área de concentração em Organização do Espaço Geográfico – Dinâmica socioambiental e Geoprocessamento, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador (a): Profa. Dra. Rochana Campos de Andrade Lima Santos

**Maceió, Alagoas**

**2021**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico Bibliotecária**

R175a Ramos, Anderson dos Santos.

Análise da aplicabilidade do método AHP, para mapeamento de vulnerabilidade a inundações, na bacia do rio Mundaú, em Alagoas / Anderson dos Santos Ramos. – 2021.

72 f. : il. color.

Orientadora: Rochana Campos de Andrade Lima Santos.

Dissertação (mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 68-72.

1. Inundações - Vulnerabilidade. 2. Mundaú, Lagoa (AL). I. Título.

CDU: 911.2:551.311.2(813.5)

Ao meu filho, que tanto amo e que sempre  
me faz querer ser uma pessoa melhor.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a Universidade Federal de Alagoas, e toda sua estrutura de professores que me ajudaram na busca pela conclusão deste objetivo.

Não tenho palavras para agradecer a minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Rochana Campos de Andrade Lima Santos, por ter sempre me incentivado a crescer academicamente.

Agradeço a minha família, minha Zélia, meu pai Adelson e minha irmã Bárbara, por todo apoio que recebi ao longo de todo o mestrado.

Também não poderia deixar de agradecer ao meu amigo/irmão Nicolas Gama por todo apoio não só nas pesquisas, mas também na minha vida pessoal.

Ao pessoal do Laboratório de geofísica e geologia das engenharias-CTEC e do do laboratório de oceanografia geológica do LABMAR, na pessoa da engenheira ambiental Clyvia Roberta de Souza e os demais estagiários que já passaram por lá e que de alguma forma contribuíram para construção do profissional que me tornei hoje, o qual me orgulho bastante.

Agradeço a minha grande amiga Laís Santos, por todo apoio e incentivo que me deu desde o ingresso no Programa de Pós-Graduação, e principalmente nessa reta final.

Enfim, gratidão a todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse nesse momento, muito obrigado.

## RESUMO

Em junho de 2010, os Estados de Alagoas e Pernambuco foram atingidos por uma tempestade tropical que causou inundações na região hidrográfica do rio Mundaú. Esse evento, afetou as regiões ribeirinhas, que em sua maioria é composta por populações carentes. As Inundações ao longo dos vales dos rios, têm um impacto ambiental e social de grandes proporções e atingem as populações mais vulneráveis agravando suas situações. Este cenário, faz parte de um problema mundial e nacional, onde a região Nordeste ocupa o segundo lugar em episódios de inundação de grandes proporções no Brasil. Em geral, o custo dos investimentos empregados nos eventos pós desastre são muito superiores quando comparados às medidas de prevenção. As inundações em ambientes urbanos ocorrem devido a um somatório de fatores ambientais e socioeconômicos que associados à alta precipitação causam diversos prejuízos. O rio Mundaú tem sua bacia hidrográfica inserida nos estados de Pernambuco, onde tem sua nascente, no município de Caetés, e de Alagoas, onde está sua foz, na laguna Mundaú. Em seu percurso atravessa 15 municípios, por perpassar o território de dois estados, o rio Mundaú enquadra-se na categoria de rio Federal, sendo assim administrado pela Agência Nacional de Águas. O objetivo desta dissertação visa analisar a vulnerabilidade à inundação na Bacia do Mundaú em Alagoas por meio da aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Para isso foram utilizados dados matriciais do Satélite ALOS PALSAR da Bacia Hidrográfica do Mundaú em Alagoas: Sistema Geodésico de Referência WGS 84, fornecidos pela Alaska Satellite Facility –ASF, o qual foi possível gerar mapas de Altitude, Declividade, Distância à Drenagem Mais Próxima ou HAND, onde houve a atribuição das notas e pesos, de acordo com a suscetibilidade à inundação e em seguida foi realizada a álgebra de mapas, que evidenciou as áreas de vulnerabilidade. Assim, foi possível evidenciar que os rios Mundaú e Canhoto, possuem extensas áreas de alta vulnerabilidade à inundação nos seus cursos, sobretudo nas áreas urbanizadas. Com tais resultados os agentes públicos poderão utilizar a presente pesquisa como ferramenta na implementação de políticas públicas de prevenção e mitigação dos impactos causados em decorrência de eventos hidrológicos de grande magnitude.

Palavras-chave: Vulnerabilidade, inundação, Mundaú.

## ABSTRACT

In June 2010, a tropical storm hit the states of Alagoas and Pernambuco, causing a flood in the Mundaú hydrographic region, affecting many low-income riverside families. These flooding events along river valleys frequently have major environmental and social impacts and represent a concerning national problem in Brazil, where the northeast region is the second most affected by large scale episodes. They are normally caused by a combination of high precipitation rates and environmental and socioeconomical factors and it is usually more cost-effective to invest in prevention measures than post-disaster measures. The Mundaú river spans the states of Alagoas and Pernambuco being classified as a federal river and managed by the Agência Nacional de Águas. It springs in the municipality of Caetés in Pernambuco, flowing approximately 4.126km through 15 municipalities until it reaches the Mundaú lagoon in Alagoas. The main goal of this study was to identify regions susceptible to flooding in the Mundaú hydrographic basin using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. We used data from the ALOS PALSAR satellite provided by the Alaska Satellite Facility (ASF). We generated maps of elevation, slope and distance from the closest drainage or HAND. Then, maps were weighted according to their susceptibility to flooding episodes and vulnerable areas were identified through map algebra using AHP. The analyses revealed extensive areas along the Mundaú and Canhoto rivers that are highly susceptible to flooding, particularly urban areas. These results can contribute to the development of public policies that mitigate and prevent impacts caused by large-scale flooding events.

Keywords: Vulnerability, flood, Mundaú.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de uma bacia hidrográfica.....	19
Figura 2: Modelo esquemático de enchente e inundação .....	22
Figura 3: Modelo HAND .....	24
Figura 4: Região Hidrográfica do Mundaú AL/PE.....	30
Figura 5: Mapa de localização da área de estudo.....	31
Figura 6: Ocupação às margens do rio Canhoto.....	32
Figura 7: Vista da destruição da enchente do Rio Mundaú no município de União dos Palmares em 2010 .....	33
Figura 8: Destruição em Branquinha/AL .....	34
Figura 9: Inundação na cidade de Murici .....	35
Figura 10: Efeitos da enchente de 2010 em Rio Largo .....	35
Figura 11: Danos causados pela inundação em Santana do Mundaú .....	36
Figura 12: Mapa Geológico .....	39
Figura 13: Mapa Geomorfológico .....	40
Figura 14: Quantificação de Solos .....	41
Figura 15: Mapa de solos .....	42
Figura 16: (A) Modelo HAND sob os limites do relevo suscetível. (B) HAND classificado de acordo com a suscetibilidade a inundações e recortada pelos padrões de relevo suscetíveis.....	47
Figura 17: Reclassificação de valores de acordo com a suscetibilidade à inundação .....	48
Figura 18: APP vs. Ocupação em Branquinha .....	49
Figura 19: APP vs. Ocupação em Rio Largo.....	50
Figura 20: APP vs. Ocupação em São José da Laje.....	50
Figura 21: APP vs. Ocupação em Murici.....	51
Figura 22: APP vs. Ocupação em União dos Palmares .....	51
Figura 23: APP vs. Ocupação em Santana do Mundaú .....	52
Figura 24: Altura alcançada pelo rio Mundaú durante a cheia de 2010 .....	52
Figura 25: Mapa de Altitude, recorte da bacia do Mundaú em Alagoas .....	53
Figura 26: Reclassificação do mapa de Altitude.....	54
Figura 27: Mapa em Declividade Percentual de Relevo com destaque para a planície de inundação.....	55
Figura 28: (A) Declividade em percentual de relevo restrito à área de inundação. (B) Reclassificação de vulnerabilidade a ocorrência de fenômenos de inundação.....	55
Figura 29: Integração das variáveis .....	57
Figura 30: Atlas de Vulnerabilidade a Inundações .....	58
Figura 31: Mapa de Vulnerabilidade à inundação .....	59
Figura 32: (A) Modelagem inundação de São José da Laje - AHP. (B) Modelagem a Inundação de São José da Laje – CPRM (2013) .....	60
Figura 33: A) Modelagem inundação de União dos Palmares - AHP. (B) Modelagem a Inundação de União dos Palmares – CPRM (2014).....	62
Figura 34: A) Modelagem inundação de Branquinha - AHP. (B) Modelagem a Inundação de Branquinha – CPRM (2014). .....	63

Figura 35: (A) Modelagem inundação de Murici - AHP. (B) Modelagem a Inundação de Murici – CPRM (2014).....	64
Figura 36: (A) Modelagem inundação de Rio Largo – AHP (2021) .....	65
Figura 37: (A) Modelagem inundação de Santana do Mundaú - AHP. (B) Modelagem a Inundação de Santana do Mundaú – CPRM.....	66

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Categorias, autores, área de estudo e número de critérios.....	26
Quadro 2 - Autores e critérios encontrados na revisão de literatura.....	27

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASF - Alaska Satellite Facility – ASF

AHP - Analytic Hierarchy Process

ANA - Agência Nacional de Águas

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

PNPDEC - Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

SINPDEC - Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil

CONPDEC - Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

MAM - Métodos de Análise Multicritério

PDRH - Plano Diretor de Recursos Hídricos

SEMARH - Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos

IMA - Instituto de Meio Ambiente

CELMM - Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba

APP - Áreas de Preservação Permanente

*ALOS - Advanced Land Observing Satellite*

*HAND - Height above the rearest drainage*

AVADAN - Avaliação de Perdas e Danos

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Justificativa .....	16
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	17
2.1 Geral .....	17
2.2 Específico .....	17
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
3.1 A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - Lei 12.608/2012 .....	18
3.2 Bacia Hidrográfica.....	19
a) O método AHP em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas – SIG 23	
<b>4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	29
4.1 Regiões atingidas por enchentes nos últimos anos .....	32
a) Clima.....	36
b) Temperatura.....	37
c) Umidade.....	38
d) Hidrografia.....	38
e) Geologia e Geomorfologia .....	38
f) Vegetação e uso do solo.....	40
g) Solos .....	40
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
5.1 Materiais .....	42
5.2 Recursos tecnológicos e hardware .....	43
5.3 Fluxograma de atividades realizadas.....	43
5.4 Métodos .....	44
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	47
6.1 Height above the rearest drainage – HAND.....	47
6.2 Formas de relevo .....	48
6.3 Altitude .....	52
6.4 Declividade .....	54
6.5 Álgebra de Mapas.....	56
a) São José da Laje .....	60
b) União dos Palmares.....	61
c) Branquinha.....	63
d) Murici.....	64

e) Rio Largo.....	65
f) Santana do Mundaú.....	66
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>67</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à grande variedade e extensão dos danos que podem causar, que vão de danos diretos a indiretos no meio socioambiental e socioeconômico, as inundações são consideradas um dos desastres naturais mais caros. Esse tipo de evento ocorre de forma repentina e tem grande poder destrutivo, além de uma velocidade incrível. Isso significa que as inundações podem acontecer com pouco ou nenhum aviso, gerando consequências devastadoras para populações ribeirinhas (OCHA, 2020).

O estudo Desastres Naturais na América Latina e Caribe (2020), do Escritório da ONU para Assuntos Humanitários, aponta o Brasil entre os 15 países que apresentam uma maior população em áreas de risco à inundação. Segundo ele, aproximadamente 0,9% dos 190,7 milhões de habitantes do país correm o risco de ser afetados por inundações, o que representa um número de cerca de 1,8 milhão de pessoas.

É válido ressaltar que esses eventos são o tipo de desastre mais frequente no Brasil desde o ano 2000 e, a partir dessa década, em 12 ocasiões, as inundações no país causaram quantias superiores a US \$ 1 bilhão de dólares em danos totais.

Observando as regiões brasileiras mais afetadas por eventos de inundação, vemos que municípios da região Sudeste concentram a maior frequência, com 34% do total dos eventos. Em segundo lugar, está a Região Nordeste, com 25%. Na sequência, temos a Região Sul, com 22%, a Região Norte, com 13% e, por fim, a Região Centro-oeste, com 6% (Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, 2013).

No Nordeste, o estado de Alagoas possui em seu território sete Regiões Hidrográficas, essas bacias são subdivididas, cada uma com seus rios principais e afluentes, que possuem em sua história registros de cheias e inundações.

Vale destacar que a Região Hidrográfica do Mundaú está localizada na região do Nordeste brasileiro, entre Alagoas e Pernambuco, e possui uma área de 4126,7 km<sup>2</sup>, da qual 52,7% está situada no estado Pernambucano e 47,3% em Alagoas. Em 2010, a área apresentada foi cenário de inundações de grandes proporções que trouxeram prejuízos humanos e econômicos aos dois estados.

De acordo com Fragoso Júnior *et al* (2010), “as cheias naturais da bacia do Rio Mundaú, historicamente, têm causado danos com certa regularidade no estado de Alagoas”.

Para verificar a afirmação do autor, podemos observar que, nos últimos 100 anos, 7 grandes cheias assolaram a região (1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010). Os próprios moradores das áreas afetadas relatam sua convivência natural com esses eventos, fato que se confirma, já que os rios Mundaú e Canhoto são classificados como alta vulnerabilidade a inundações (ANA, 2014)

Diante desse cenário, o objetivo dessa pesquisa é analisar a vulnerabilidade à inundação na Bacia do Mundaú em Alagoas por meio da aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), um dos mais utilizados no mundo inteiro. Segundo Messias (2014) a disponibilidade de produtos cartográficos e a tecnologia de sensoriamento remoto, bem como o acesso aos Sistemas de Informação Geográficas, têm permitido avanços e proporcionado maior precisão aos estudos ambientais.

Para realização desta pesquisa, foi utilizado um dos métodos de análise multicritérios mais conhecidos e postos em prática globalmente, chamado Processo Analítico Hierárquico ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Desenvolvido na década de 1980 por Thomas L. Saaty, nos Estados Unidos, tal método é voltado para solução de problemas, aplicado para diversas situações onde existam estruturas complexas. No caso específico desta dissertação, o método tratará das inundações que atingem a bacia do Rio Mundaú em Alagoas com certa frequência.

Assim, a partir de uma extensa revisão bibliográfica e de dados levantados tais como Altitude, Declividade e Distância à Drenagem Mais Próxima, ou *HAND*<sup>1</sup>, foi possível evidenciar as áreas e o grau de vulnerabilidade a inundações para vários municípios ao longo do rio Mundaú em Alagoas.

---

<sup>1</sup> Height Above the Nearest Drainage.

## 1.1 Justificativa

A região Nordeste do Brasil ocupa o segundo lugar em episódios de inundação de grandes proporções (Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, 2013). De acordo com o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações (ANA, 2014), os principais rios da Bacia Hidrográfica do Mundaú, apresentam alta vulnerabilidade, no entanto, não há um mapeamento completo de áreas suscetíveis a inundações.

A partir da grande enchente de 2010 na região hidrográfica do Mundaú em Alagoas, foi realizada uma parceria entre a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH e Agência Nacional de Águas - ANA, que culminou na criação da Sala de Situação. Esta, por sua vez, tem como objetivo monitorar informações hídricas em tempo real, de forma que é possível planejar e antecipar ações para minimizar os prejuízos materiais e poupar vidas.

Apesar do estado possuir um Plano de Recursos Hídricos, a bacia do rio Mundaú não possui um sistema integrado entre poder público e comunidade afetada para prevenção de desastres naturais. Os municípios estudados passam por cheias avassaladoras de frequência rara, porém de ocorrência extremamente desastrosa para as comunidades residentes ao longo do rio. Assim, fixadas na área de inundação, as comunidades carecem de políticas públicas voltadas para a prevenção e gestão dos desastres.

Por esse motivo, a Lei 12.608/2012 fala sobre a necessidade da criação de ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação voltadas à proteção e defesa civil, com a participação de entes públicos e privados. Assim, é necessária a colaboração de todos na criação de medidas que possam contribuir poupando vidas e prejuízos materiais.

Assim, a presente dissertação visa analisar a vulnerabilidade à inundação na Bacia do Mundaú em Alagoas por meio da aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que permitirá identificar e categorizar as áreas de vulnerabilidade. Com isso, pretende-se auxiliar os agentes públicos responsáveis pelo ordenamento territorial na implementação de políticas públicas de prevenção e mitigação dos impactos causados em decorrência de eventos hidrológicos de grande magnitude.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Analisar a vulnerabilidade à inundação na Bacia do Mundaú em Alagoas por meio da aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

### **2.2 Específico**

- ❖ Identificar as variáveis que impactam diretamente na ocorrência de inundações;
- ❖ Analisar a vulnerabilidade da Bacia do Mundaú em Alagoas, por meio da elaboração de mapas e da comparação entre os mapeamentos;
- ❖ Comparar estes mapeamentos de vulnerabilidade ao mapeamento realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), realizado em 2014.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - Lei 12.608/2012

Diante dos recorrentes desastres naturais que atingiram cidades brasileiras nas últimas décadas, foi necessário fortalecer a Defesa Civil nos níveis municipal, estadual e federal. Com isso, o objetivo era preparar melhor as cidades brasileiras para a prevenção e a gestão de riscos decorrentes de desastres, que, no Brasil, referem-se principalmente às enchentes.

Nesse contexto, a Lei 12.608/2012 foi o instrumento legal que deu início à Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Ela dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e sobre o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) e autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres.

O artigo 2º da Lei atribui a responsabilidade de adotar medidas com vistas à redução dos riscos a desastres a União aos Estados, ao Distrito Federal e aos municípios. No entanto, já em seu segundo parágrafo, abre a possibilidade para que tais medidas possam ser adotadas com a colaboração de entes públicos, privados e com a sociedade em geral, e reitera a importância sobre a criação destes mecanismos ao afirmar que:

A incerteza quanto ao risco de desastre não constituirá óbice para a adoção das medidas preventivas e mitigadoras da situação de risco.

Quanto às diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, o artigo 4º fala que:

I - atuação articulada entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios para redução de desastres e apoio às comunidades atingidas;

II - abordagem sistêmica das ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação;

III - a prioridade às ações preventivas relacionadas à minimização de desastres;

IV - adoção da bacia hidrográfica como unidade de análise das ações de prevenção de desastres relacionados a corpos d'água;

V - planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território nacional;

VI - participação da sociedade civil.

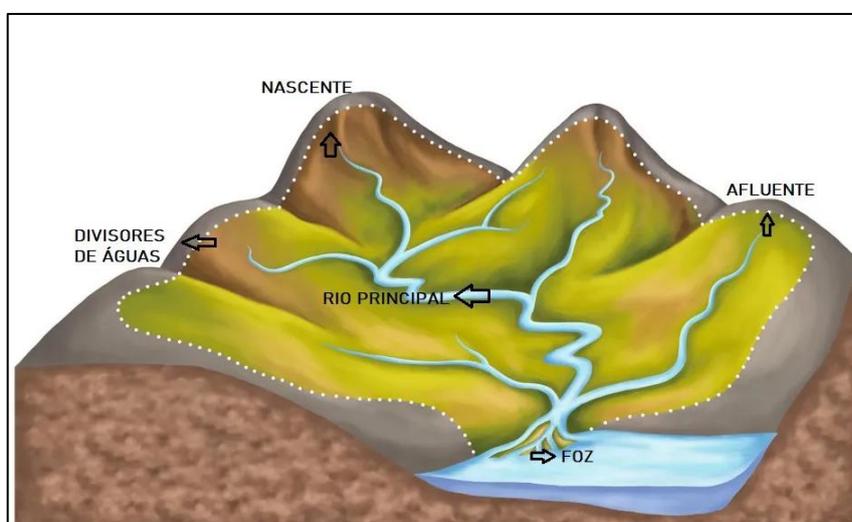
Em atendimento aos itens III, IV e V, foi escolhida como objeto de análise a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, no estado de Alagoas, considerando que ela já foi cenário de diversos eventos de inundação, sobretudo às margens do seu rio principal, o rio Mundaú.

### 3.2 Bacia Hidrográfica

Segundo Trentin (2004), o estudo de bacias hidrográficas tem um papel fundamental na caracterização do relevo, justamente por serem formas naturalmente esculpidas pela rede de drenagem.

Diferentes autores (CARAMORI *et al*, 2009; TUCCI, 1997; CHRISTOFOLETTI, 1974), trazem a definição de Bacia hidrográfica como uma unidade fisiográfica, limitada por divisores topográficos, onde é realizada a captação natural da água, atuando como um reservatório de água e sedimentos. Ela possui uma rede de drenagem, que consiste em um sistema conectado de cursos d'água, e toda a sua vazão converge para uma seção fluvial única, ponto de saída que se denomina exutório (figura 1).

Figura 1: Estrutura de uma bacia hidrográfica



Fonte: Uol (2021)

Christofolletti (1974) também acrescenta que as bacias hidrográficas podem ser classificadas em quatro tipos:

- a) exorreicas: quando o escoamento da água se faz de modo contínuo até o mar, isto é, quando as bacias deságuam diretamente no mar;
- b) endorreicas: quando as drenagens são internas e não possuem escoamento até o mar, desembocando em lagos, ou dissipando-se nas areias do deserto, ou perdendo-se nas depressões cársicas;
- c) arreicas: quando não há qualquer estruturação em bacias, como nas áreas desérticas;
- d) criptorreicas: quando as bacias são subterrâneas, como nas áreas cársticas.

Como foi visto na definição de bacias hidrográficas, elas possuem uma rede de drenagem, que é um sistema que permite a conexão de diferentes cursos de água. Além disso, essa rede reflete a estrutura geológica local e o clima, sendo um dado importante para a realização de estudos geográficos sobre um determinado local. Sobre essas redes, Lima (1996) diz que podem apresentar seis diferentes tipos de drenagem, detalhados a seguir:

- a) dendrítica: lembra a configuração de uma árvore. É típica de regiões onde predomina rocha de resistência uniforme;
- b) treliça: composta por rios principais conseqüentes correndo paralelamente, recebendo afluentes subseqüentes que fluem em direção transversal aos primeiros. O controle estrutural é muito acentuado, devido à desigual resistência das rochas. A extensão e a profundidade dos leitos serão maiores sobre rochas menos resistentes, dando formação a vales ladeados por paredes de rochas mais resistentes. Este tipo é encontrado em regiões de rochas sedimentares estratificadas, assim como em áreas de glaciação;
- c) retangular: variação do padrão treliça, caracterizado pelo aspecto ortogonal devido às bruscas alterações retangulares nos cursos fluviais. Deve-se à ocorrência de falhas e de juntas na estrutura rochosa;
- d) paralela: ocorre em regiões de vertentes com acentuada declividade, ou onde existam controles estruturais que favoreçam a formação de correntes fluviais paralelas;
- e) radial: pode desenvolver-se sobre vários tipos e estruturas rochosas, como por exemplo em áreas vulcânicas e dômicas;
- f) anelar: típica de áreas dômicas; a drenagem acomoda-se aos afloramentos das rochas menos resistentes (LIMA, 2996).

Em geral, na bacia do Mundaú, que é o espaço de análise desta dissertação, predomina a forma dendrítica. E, como já foi exposto acima, essa informação é relevante para entender a estrutura geológica. Afinal, de acordo com Monteiro (2016), a rede de drenagem possui um perfil longitudinal, que está completamente relacionado ao relevo, pois ele representa a diferença de altitude entre sua nascente e sua foz, ou confluência com outro rio. E, no caso em questão, possui um perfil longitudinal mais acentuado no alto curso da bacia, que vai da sua nascente no município de Caetés – PE, até a região de São José da Laje e Santana do Mundaú – AL. A partir do município de União dos Palmares – AL, até a região de Murici – AL, o rio Mundaú passa a ter uma média declividade, e, deste ponto até sua foz, apresenta um perfil menos acentuado, devido a presença do embasamento sedimentar. Como podemos ver, ao analisar o perfil longitudinal, é possível constatar a declividade de um rio, pois se trata de uma relação entre a altitude e o comprimento de um determinado curso d'água.

Segundo a Proposta de instituição de comitês de bacia dos rios Mundaú e Paraíba (2010), em Alagoas, além dos trechos de tabuleiros e das pequenas várzeas de relevo plano e de encostas de relevo suave ondulado, o restante da área da bacia é de domínio de topografia movimentada, de relevo ondulado, forte ondulado e montanhoso. Quanto à capacidade de uso das terras, a condição topográfica dominante é o principal fator limitante.

As formas de relevo mais comuns são o ondulado a fortemente ondulado no alto curso do rio, com algumas “serras” de altitude moderada (inferiores a 1000m), passando a ondulado a suavemente ondulado no médio curso e finalmente suavemente ondulado a plano no baixo curso. As formas relacionadas ao relevo ondulado correspondem às unidades litológicas do embasamento cristalino, enquanto aquelas suavemente onduladas a planas, relacionam-se à bacia sedimentar e a sedimentos recentes. (Proposta de instituição de comitês de bacia dos rios Mundaú e Paraíba, 2010).

No estado de Alagoas, os rios Mundaú e Canhoto perpassam 6 municípios: São José da Laje, Santana do Mundaú, União dos Palmares, Branquinha, Murici e Rio Largo. De acordo com a estimativa populacional, estes possuem juntos uma população de cerca de 215.180 habitantes (IBGE, 2021).

De acordo com Ielo (2015) o território usado possui características peculiares, conforme suas funções socioculturais. Dessa forma, esses espaços habitados tendem a estar em constante mudança, já que sofre alterações a depender de fatores históricos e socioeconômicos.

De acordo com Tucci (2008), o desenvolvimento urbano foi impulsionado durante a segunda metade do século XX a partir da concentração da população em espaços cada vez mais reduzidos, gerando assim uma espécie de disputa pelos recursos naturais (solo e água), degradando parte da biodiversidade natural. Ainda de acordo com o autor, o meio formado pelo ambiente natural e pela população está em constante mudança, gerando uma série de efeitos interligados, que, sem controle, podem levar a cidade a passar por sérios problemas. Já segundo Montalvani (2018), a cidade apresenta as diversas formas em que a sociedade se organiza espacialmente no território, realizando modificações consideráveis no meio ambiente. Em decorrência da velocidade que as modificações ocorrem, isso acaba contribuindo para desencadear desastres.

Nesse sentido, um equívoco que Ielo (2015) ressalta é que “[...] nem o risco social nem o natural devem ser confundidos com a catástrofe”. Dessa forma, temos que o risco é algo com probabilidade de ocorrer, podendo também não se concretizar, porém a catástrofe é algo diretamente materializável.

Voltando a Montalvani (2018), vemos que o autor conceitua “inundação” como um fenômeno de transbordamento de águas do canal fluvial para as áreas de planície ou várzea. Sendo assim, a água da chuva é a responsável pelo aumento do nível do rio além da capacidade de descarga do canal de drenagem (figura 2).

Figura 2: Modelo esquemático de enchente e inundação



É importante destacar que os termos “enchente” e “alagamento” são fenômenos distintos. Cheia, ou enchente, são termos que se referem ao aumento da vazão causada por águas pluviais e pelo aumento do escoamento superficial causado por ela. É importante salientar que a cheia é um fenômeno hidrológico natural, que pode ou não provocar inundação. Já o alagamento é caracterizado pelo extravasamento das galerias da rede de drenagem, ou seja, ocorre quando as galerias não são suficientes para conduzir os efluentes, resultando no extravasamento. Alagamentos ocorrem em decorrência de problemas como obstrução das galerias por lixo e entulho.

#### **a) O método AHP em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas – SIG**

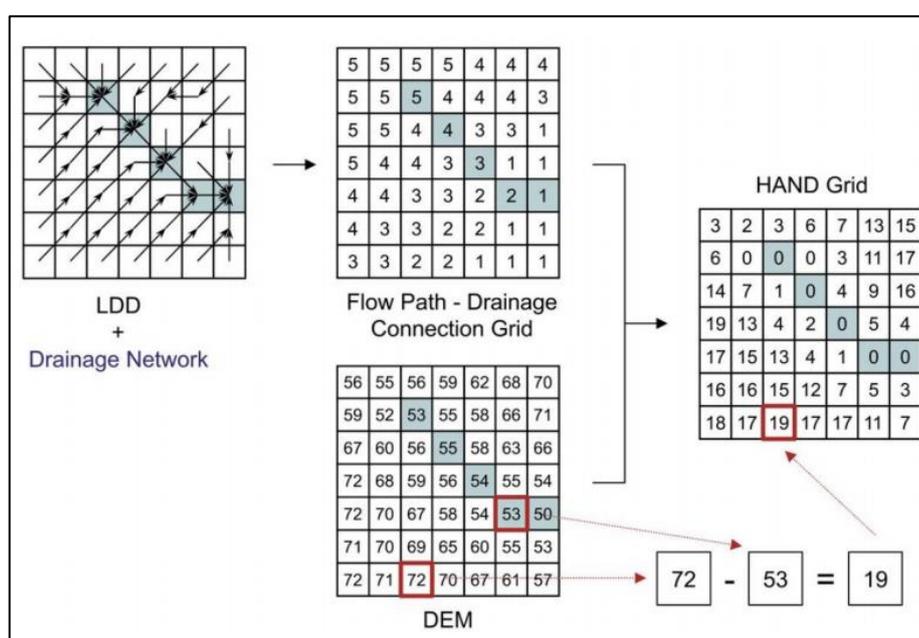
De acordo com Pimenta *et al.* (2019) diversos problemas na área de planejamento que envolvem uma análise do território com vistas ao atendimento de um ou mais objetivos, em geral, possuem uma quantidade considerável de variáveis envolvidas. Estas devem ser analisadas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas – SIG, o que caracteriza uma análise espacial multicritério.

A análise multicritério com viés espacial tem sido amplamente utilizada na tomada de decisão no mundo todo. Ela é aplicada sobretudo no planejamento da ocupação e uso do solo, mas também na escolha de áreas aptas a diversos tipos de uso, tendo em vista a redução de custos, a redução de impactos e a potencialização dos benefícios. Além disso, ela avalia a aptidão ou não de áreas para implementação de construções privadas e/ou públicas (COLLINS; STEINER; RUSHMAN, 2001).

Montalvani *et al.* (2018) a utilizou em sua proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis à inundação e/ou alagamento na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS. Já Conceição (2019) utilizou o mesmo tipo de análise na modelagem de suscetibilidade a inundação do município de Presidente Kennedy, inclusive utilizando uma variável que tem sido amplamente utilizada em modelagens deste tipo, e que será utilizada nesta dissertação, a variável HAND.

Elaborada por RENNÓ et al. (2008), a Distância a Drenagem Mais Próxima ou HAND, é a variável mais importante quando se trata de modelos de inundação, pois determina a cota de inundação de uma determinada área. Ela calcula a distância acima da drenagem mais próxima, ou seja, calcula a diferença de altitude da rede de drenagem em relação às áreas vizinhas, fazendo uso de Modelos Digitais de Elevação, como pode ser visto na figura 3. Sendo assim, as regiões com pequena diferença de altura em relação à rede de drenagem tendem a ter uma maior suscetibilidade a inundações.

Figura 3: Modelo HAND



Fonte: RENNÓ et al. (2008)

São diversos os estudos que têm utilizado e atestado a eficácia do modelo HAND para diversas aplicações (NOBRE et al., 2011; CONCEIÇÃO et al., 2019; MOMO et al., 2016; ABRANTES, 2020; GOERL et al., 2017). Evidentemente, a qualidade do modelo está diretamente relacionada à qualidade do Modelo Digital de Elevação. Ou seja, quanto melhor a qualidade dos dados, melhor o será o mapeamento. No entanto, é unânime que o HAND traz ótimos resultados, sobretudo para mapeamento de áreas de inundação.

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2021), inundações são processos de grande complexidade, pois contemplam diversas variáveis que fazem parte dos aspectos tanto topográficos como hidrológicos de uma determinada área de

estudo. São diversas as metodologias para predição do alcance de uma mancha de inundação. Por exemplo, podem ser utilizados diversos métodos e variáveis, entre as quais se destacam as variáveis topográficas e hidrológicas.

Pimenta *et al.* (2019) realizou um estudo com o objetivo de apresentar um levantamento bibliográfico com abordagem exploratória sobre a aplicação do método AHP em combinação com o ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). A partir da compreensão teórica e prática do método AHP, demonstrou os múltiplos usos encontrados na recente literatura científica, bem como as suas aplicações no processo de tomada de problemas envolvendo dados espaciais (Quadro 1).

**Quadro 1** - Categorias, autores, área de estudo e número de critérios.

<b>Categorias</b>	<b>Autores</b>	<b>Área de Estudo</b>	<b>Número de critérios</b>
Planejamento Urbano	(1) Dai, Lee e Zhang (2001)	Área urbana do município de Lanzhou, Noroeste da China.	4
	(2) Lima et al. (2008)	Área urbana do município de São Carlos, São Paulo, Brasil.	9
Deslizamento de Terra	(3) Yalcin et al. (2011)	Município de Trabzon, nordeste da Turquia.	7
	(4) Basu e Pal (2017)	Bacia hidrográfica de Gish, oeste da Índia.	5
Turismo	(5) Bunruamkaew e Murayama (2011)	Província de Surat Thani, Tailândia.	5
	(6) Ghamgosar et al. (2011)	Área urbana do município de Langrood, Irã.	6
Irrigação	(7) Anane et al. (2012)	Região de Nabeul-Hammamet, Tunísia.	5
Serviços Ecológicos	(8) Estoque e Murayama (2012)	Área urbana do município de Baguio, Filipinas.	3
Agricultura/Uso da terra	(9) Akinci, Özalp e Turgut (2013)	Distrito de Yusufeli na cidade de Artvin, Turquia.	9
	(10) Mishra, Deep e Choudhary (2015)	Município de Uttarakhand, Índia.	6
Desenvolvimento Sustentável / Encostas	(11) Chandio et al. (2014)	Município de George, Malásia.	10
Construção de estações de combate a incêndio	(12) Wei et al. (2011)	Área urbana de Pequim, China.	3
	(13) Chaudhary et al. (2016)	Região metropolitana de Kathmandu, Nepal.	4
Energia	(14) Uyan (2013)	Região de Karapinar, Konya/Turquia.	5
	(15) Azevêdo, Candeias e Tiba (2017)	Estado de Pernambuco.	4
Risco de Inundação	(16) Roslee et al. (2017)	Área de Penampang, Sabah/Malásia.	8
Recursos Hídricos	(17) Gdoura, Anane e Jellali (2015)	Área do aquífero raso de Nabeul-Hammamet, Tunísia.	6
	(18) Shekhar e Pandey (2015)	Distrito de Palamu, Estado de Jharkhand, Índia.	8
	(19) Pinto et al. (2017)	Bacia hidrográfica de Comoro, Timor Leste.	8
Saúde	(20) Camargo et al. (2017)	Região Metropolitana de Campinas, Brasil.	7

Fonte: Pimenta *et al.* (2019).

Os critérios utilizados nos estudos apresentados demonstram o caráter espacial da seleção deles pelos autores, visto que a maioria dos critérios se alinham com dados de distribuição espacial e de localização. O quadro 2 apresenta a diversidade de critérios utilizados na literatura consultada.

**Quadro 2 - Autores e critérios encontrados na revisão de literatura.**

<b>Autor</b>	<b>Crítérios Utilizados</b>
Dai, Lee e Zhang (2001)	Topografia; Condições do Solo; Lençóis Freáticos; Risco Geológico.
Lima et al. (2008)	Volume de Tráfego e Classificação Funcional; Tipo de Rota; Capacidade Funcional; Capacidade Estrutural; Idade; Localização; Questões de Segurança; Questões Ambientais; Fatores Econômicos.
Yalcin et al. (2011)	Geologia; Declividade; Aspecto; Elevação; Cobertura da Terra; Proximidade ao Sistema ou Rede de Drenagem e Distância de Estradas.
Basu e Pal (2017)	Fatores Desencadeantes; Fatores Litológicos; Fatores de Superfície; Fatores Antropogênicos; Fatores Protetivos.
Bunruamkaew e Murayama (2011)	Paisagem; Vida Selvagem; Topografia; Acessibilidade; Características da Comunidade.
Ghamgosar et al. (2011)	Elevação; Declividade; Aspecto; Solo; Rocha; Uso do Solo.
Anane et al. (2012)	Classes de Capacidade de Uso da Terra; Conflitos de Recursos; Econômico; Ambiental.
Estoque e Murayama (2012)	Taxa Anual de Crescimento Populacional; Elevação; Declividade.
Akinci e Özalp e Turgut (2013)	Classes de Solo; Classes de Capacidade de Uso da Terra; Subclasses de Capacidade de Uso da Terra; Profundidade do Solo; Erosão; Outras Propriedades do Solo; Declividade; Aspectos (Irradiação); Elevação.
Mishra, Deep e Choudhary (2015)	Drenagem; Rodovias; Solo; Geologia; Uso e Cobertura da Terra; Declividade.
Chandio et al. (2014)	Rodovia Primária, Rodovia Secundária, Elevação, Declividade, Aspecto, Terras Agrícolas, Área Florestal, Residência Existente, Terras Alagadas, Águas superficiais
Wei et al. (2011)	Densidade Populacional; Perdas após Incêndios Prediais; Distância da Estação de Combate a Incêndio mais Próxima.
Chaudhary et al. (2016)	Distâncias das Rodovias; Cobertura da Terra; Distância dos Rios; Densidade Populacional.
Uyan (2013)	Distância de Áreas Residenciais; Uso da Terra; Distância de Rodovias; Declividade; Distância de Linhas de Transmissão.
Azevêdo, Candeias e Tiba (2017)	Climático; Topografia; Ambiental; Localidade.
Roslee (2017)	Precipitação; Gradiente de Declividade; Elevação; Densidade de Drenagem; Uso da Terra; Texturas do Solo; Curvas de Declividade; Acúmulo de Fluxo
Gdoura, Anane e Jellali (2015)	Textura do Solo; Geologia; Elevação; Uso da Terra; Distância de Áreas Urbanas; Qualidade da Água Subterrânea.
Shekhar e Pandey (2015)	Geomorfologia; Litologia; Solo; Declividade; Densidade Linear; Densidade de Drenagem; Pluviosidade; Espessura da Zona de Resistência.
Pinto et al. (2017)	Densidade Linear; Uso da Terra; Declividade; Topografia; Solo; Litologia; Densidade de Drenagem; Precipitação.
Camargo et al. (2017)	Iluminação Pública; Pavimentação; Calçamento; Arborização; Esgoto a Céu Aberto; Lixo Acumulados; Rede Geral Distribuição de Água.

Fonte: Pimenta *et al.* (2019).

Como visto nos quadros acima, a definição de critérios é um passo importante para analisar a possibilidade de uso de um determinado local para um fim específico. Se uma empresa precisa instalar um galpão para armazenar seu estoque, por exemplo, é necessário fazer uma avaliação sobre o local para compreender se ele é seguro, se tem fácil acesso a rodovias para otimizar o transporte, se é um espaço propício a alagamentos, entre outras questões. Em geral, os critérios de análise, são definidos por uma equipe multidisciplinar, sendo assim, equipes diferentes podem utilizar critérios diferentes para resolver o mesmo problema, porém os resultados devem coerentes com o objetivo proposto.

Nessas situações, o Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem se destacado como a ferramenta principal para tomada de decisão, principalmente pelo aumento da oferta de softwares de geoprocessamento e linguagem de programação que são capazes de manipular dados geográficos. Além do uso clássico de mapeamento em ambiente SIG, há o surgimento do uso de Métodos de Análise Multicritério – MAM, sendo esta uma subdisciplina de pesquisa operacional que considera diversos critérios em ambientes de tomada de decisão (PIMENTA *et al.*, 2019).

O Método de Análise Multicritério, associado aos Sistemas de Informações Geográficas, fornece procedimentos mais alinhados com a solução de problemas, permitindo que a seleção de áreas seja avaliada de acordo com critérios de decisões complexas e informações georreferenciadas. Isso ocorre porque a seleção das áreas pode ser feita de maneira mais ampla, utilizando um conjunto de alternativas.

O Processo Analítico Hierárquico, em Inglês *Analytic Hierarchy Process* (AHP), está entre os métodos de análise multicritério mais conhecidos e utilizados globalmente. Desenvolvido na década de 1980, nos Estados Unidos, por Thomas L. Saaty, trata-se de uma metodologia com o objetivo de solucionar problemas de escolha e pode ser aplicada a diversas circunstâncias onde ocorram estruturas complexas.

A metodologia AHP analisa comparações pareadas de variáveis em conjunto aos julgamentos e pesos, que são definidos por especialistas para avaliar critérios qualitativos ou intangíveis.

Dessa forma, o método AHP tem sido amplamente utilizado para solucionar problemas de adequabilidade de terras, por meio de pesos e notas que determinadas variáveis envolvidas no processo têm no alcance do objetivo da análise em questão. A metodologia fornece fortes indicativos para que os tomadores de decisão realizem a escolha de áreas baseados na sistematização dos critérios envolvidos no tema (CHANDIO *et al.*, 2013).

Segundo Sousa *et al.* (2017), o método AHP possui três etapas fundamentais: a construção de hierarquia; análise de prioridade e a verificação da consistência do modelo. No entanto, apesar de possuir uma estrutura de normas a serem desenvolvidas no processo, ele ainda traz um nível de subjetividade.

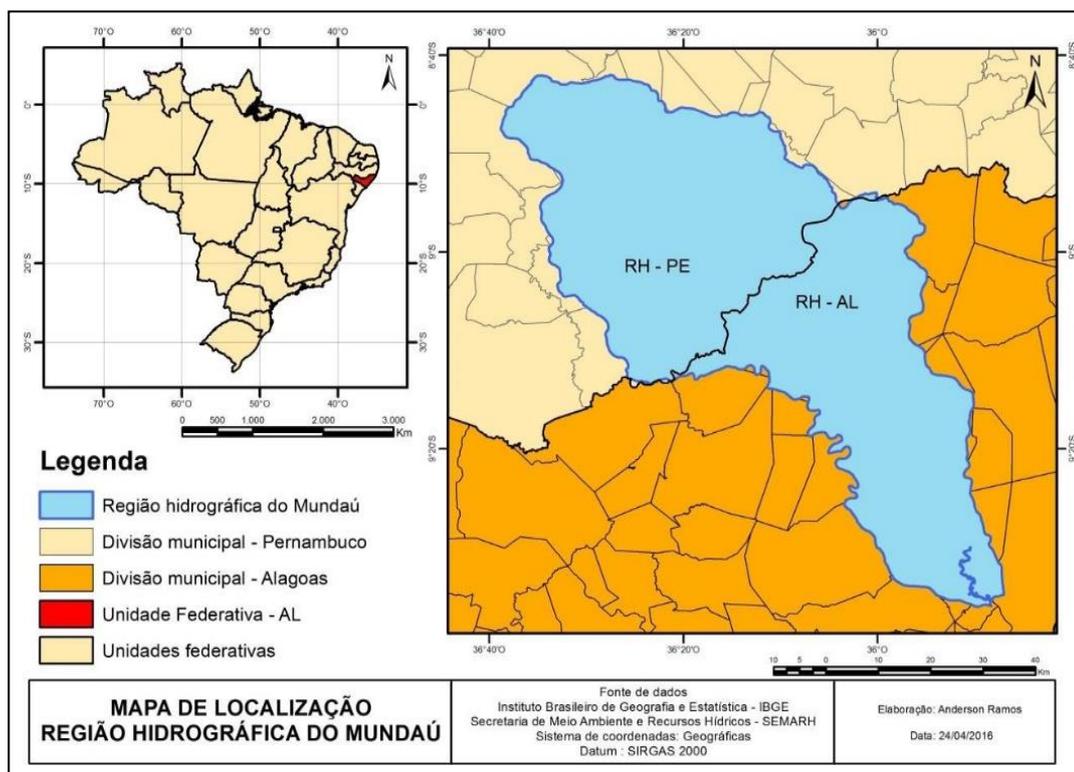
Em consonância com essa ideia, Saaty (2008) fala que a escala de preferência é considerada objetiva. Afinal, ao fazer a análise de uma região, são pré-definidos critérios pragmáticos e determinadas as prioridades. No entanto, o julgamento e as preferências sempre vão carregar um caráter subjetivo, justamente por serem atribuídos pesos que são proporcionais ao nível de importância dado às variáveis pelo tomador de decisão. Ou seja, a importância dada aos critérios muitas vezes sofre a interferência da subjetividade de quem os definiu.

#### **4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

Segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Mundaú (PDRH, 1999), a Bacia do Mundaú possui em sua totalidade 4.126 km<sup>2</sup> e está inserida nos estados de Pernambuco, onde está localizada sua nascente, e de Alagoas, onde está localizada sua foz.

Por se localizar entre dois estados, como pode ser visto na figura 4, o rio Mundaú enquadra-se na categoria de rio federal. Por isso, é administrado pela Agência Nacional de Águas - ANA. Sua nascente está localizada no município de Caetés – PE e sua foz na laguna Mundaú. A área da bacia hidrográfica inserida no estado de Pernambuco é de 2.155 km<sup>2</sup>, passando total ou parcialmente por 15 municípios.

Figura 4: Região Hidrográfica do Mundaú AL/PE

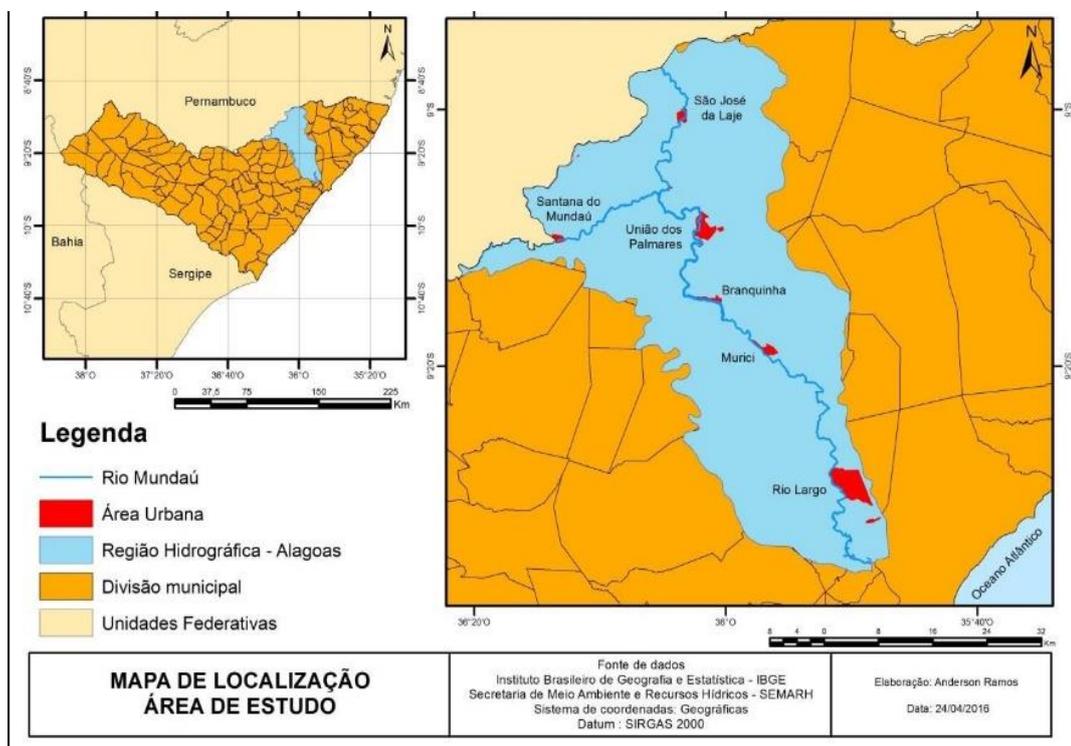


Fonte: Base de dados vetorial IBGE e SEMARH, Autor 2020 .

Segundo o PDRH (1999), em Alagoas a bacia hidrográfica do Mundaú possui uma área de 1.971 km<sup>2</sup>, localizada na mesorregião do Leste Alagoano, iniciando pelos municípios de São José da Laje e Santana do Mundaú e desaguando no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba – CELMM. O rio Mundaú então perpassa as áreas urbanas dos seguintes municípios: Santana do Mundaú, São José da Laje, União dos Palmares, Branquinha, Murici, Messias, Rio Largo, Satuba e Maceió, com população total estimada de 1.264.760 habitantes (IBGE, 2019).

É em Alagoas onde se observam as maiores densidades de população por área de municípios situada dentro da bacia, em razão das maiores aglomerações urbanas existentes na Zona da Mata (figura 5). (Moura e Teixeira, 1997 *apud* Proposta de instituição de comitês de bacia dos rios Mundaú e Paraíba, 2010).

Figura 5: Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Base de dados vetorial IBGE e SEMARH, Autor 2020.

Para Vargas (2008), a instalação de assentamentos urbanos sobre Áreas de Preservação Permanente – APP acaba por gerar uma linha tênue entre a preservação e degradação dos recursos naturais. Isso passa a representar um conflito socioambiental: por um lado, as populações possuem necessidades básicas, mas, por outro, essas necessidades acabam por gerar resíduos sólidos e impactos ambientais. Neste sentido, de acordo com o Código Florestal - Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, Área de Preservação Permanente define-se como:

Área protegida nos termos dos arts. 2º e 3º desta Lei, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

Porém, a falta de educação ambiental da população ribeirinha faz com que o lixo seja lançado em locais inadequados, como valões e encostas (BARBOSA; ESTEVAM, 2013). Com a ocorrência de chuvas de maior intensidade todo o material

é então transportado para áreas de várzea, contaminando os rios e conseqüentemente, a população.

Um outro fator que contribui para agravamento do problema são as construções realizadas na região que compreende a bacia hidrográfica. Segundo Souza (2011), na bacia do Rio Mundaú, as residências são construídas de forma improvisada, realizando significativas interferências nos componentes físicos do ambiente. As margens do vale foram gradativamente descaracterizadas, principalmente para receber o cultivo da cana.

#### **4.1 Regiões atingidas por enchentes nos últimos anos**

O Município de São José da Laje já foi palco de grandes eventos de inundações. O mais lembrado pela população é o de 14 de março de 1969, quando o nível do Rio Canhoto subiu repentinamente durante a madrugada, fazendo centenas de vítimas. Esse número não pode ser dito com exatidão, pois diversos corpos nunca foram encontrados.

De acordo com Madeiro (2016), o vice-prefeito da época, Osvaldo Timóteo, após o evento, reconstruiu a cidade e baixou um decreto proibindo a construção em locais que foram atingidos pela enchente. No entanto, com o passar do tempo e a sucessão de prefeitos, o decreto não foi respeitado. Assim, as construções em áreas inapropriadas a moradia voltou a acontecer, como pode ser visto na figura 6.

Figura 6: Ocupação às margens do rio Canhoto



Fonte: Beto Macário (2010)

União dos Palmares também sofreu com as enchentes, em 2010. Uma extensa área do perímetro urbano foi atingida, com cerca de 5.000 casas alcançadas, sendo que a maior parte delas foi completamente destruída. O volume e a energia da água foram tão altos que a enchente foi capaz de carregar tanques de armazenamento de álcool da usina Laginha, que ficava próxima ao rio Mundaú. No entanto, diversas casas encontram-se nos mesmos locais, permanecendo em área de risco (CPRM, 2012).

De acordo com o Relatório Avaliação de Perdas e Danos (2012), cerca de 18% dos moradores da cidade tiveram suas residências atingidas, entre desalojados ou desabrigados. Esse percentual, no entanto, foi ainda maior em cidades como Santana do Mundaú, onde aproximadamente metade da população teve que desocupar suas casas como consequência das inundações de junho de 2010 (Figura 7).

Figura 7: Vista da destruição da enchente do Rio Mundaú no município de União dos Palmares em 2010



Fonte: Walter e Milan (2010)

Branquinha não se diferencia quanto à ocupação territorial desordenada em áreas inapropriadas. Em geral, na cidade, a ocupação ocorre de forma desordenada e irregular. O Serviço Geológico do Brasil descreve da seguinte forma:

Construções de moradias em áreas inadequadas, executadas sem supervisão técnica, e obras de drenagem e de contenção de taludes mal dimensionadas. Da mesma forma, a ocupação inadequada de áreas situadas na planície aluvionar do Rio Branca e do Rio Mundaú e seus afluentes submetidos a enchentes e alagamentos, causa

problemas diversos para as moradias instaladas no leito do rio e em sua planície de inundação (CPRM, 2012).

Essas condições de ocupação existentes no local são um agravante para as enchentes quando associadas ao excesso de chuvas a montante do rio. Afinal, esse excesso faz com que o curso d'água extravase, atingindo diversas construções que estavam localizadas na planície fluvial, como pode ser visto na figura 8.

Figura 8: Destruição em Branquinha/AL



Fonte: Leo Caldas (2010)

A cidade de Murici foi outra que também foi atingida pela a enchente de 2010, passando por prejuízos decorrentes do desastre. Com uma população de 26.760 habitantes (IBGE, 2010), mais de 40% dos domicílios foram atingidos pela cheia. Nesse cenário, os danos materiais foram estimados em cerca de 1,5 milhões (AVADAN, 2010).

Figura 9: Inundação na cidade de Murici



Fonte: Portal Alagoas 24 horas

O município de Rio Largo, que em 2010 possuía uma população de 68.481 habitantes (CENSO, 2010), teve 2.994 domicílios populares destruídos e, assim, foi um dos mais afetados no setor habitacional. No setor educacional, 14 escolas sofreram algum tipo de impacto, e a reocupação do setor teve um curso estimado de cerca de 15 milhões (AVADAN, 2010). O evento pode ser visualizado na figura 10.

Figura 10: Efeitos da enchente de 2010 em Rio Largo



Fonte: 7 segundos (2015)

O município de Santana do Mundaú teve 100% da sua população afetada pela enchente de 2010 (AVADAN, 2010). O processo de ocupação da região, associado à

geomorfologia, propiciou tantos danos à população porque as residências estão localizadas em uma região de vale e muito próximas ao rio, que já possui em extenso histórico de enchentes. É possível observar os efeitos na figura 11.

Figura 11: Danos causados pela inundação em Santana do Mundaú



Fonte: Maciel Dantas (2013)

#### a) Clima

Conceituado como as condições atmosféricas médias de uma determinada região, o clima é um dado fundamental para quem faz pesquisa na área da Geografia. As classificações climáticas, por sua vez, são de grande valia porque analisam e definem os climas, levando em consideração vários elementos climáticos simultaneamente e facilitando a troca de informações e análises para atender a diferentes objetivos (ROLIM *et al.*, 2007). Por isso, esse é um fator que deve ser considerado para o desenvolvimento desta pesquisa.

Segundo Carvalho (2002), seguindo a classificação de Koppen, o clima predominante na bacia do rio Mundaú é o do tipo As' e Bsh. Nele, predomina a estação seca na primavera-verão com chuvas e eventuais trovoadas de norte e noroeste, e às vezes de nordeste. Já durante o outono-inverno, predomina a estação chuvosa, com chuvas de março, vindas do norte, e chuvas do principal período, vindas de sudeste, de abril-maio até julho-agosto, com interrupções.

## **b) Temperatura**

Assim como o clima, a temperatura é uma variável que deve ser considerada ao fazer uma análise geográfica de uma região. Aqui, ela surge principalmente porque a ocorrência de chuvas é determinante para a ocorrência de enchentes.

Partindo para a análise da temperatura na Bacia do Mundaú, temos que, de acordo com Carvalho (2002) a radiação solar depende principalmente da altura do sol sobre o horizonte, ou seja, do ângulo de incidência dos raios solares. Como este ângulo varia na proporção inversa da latitude, áreas localizadas em latitudes mais baixas, como a Bacia do Rio Mundaú, ficam submetidas a uma radiação mais intensa.

Segundo o autor, foram utilizados três pontos de informação para a determinação dos valores da Bacia do Mundaú: a da cidade de Palmeira dos Índios, Garanhuns e Maceió.

As mensais médias verificadas em Maceió e Palmeira dos Índios são muito próximas, tendo apenas uma amplitude de 2,8°C em torno de uma média anual de 24,8°C em Maceió, 4,8°C em torno de uma média anual de 24,4°C em Palmeira dos Índios e 3,7°C para uma média anual de 20,5°C em Garanhuns. Evidentemente, as médias mensais a montante da bacia recebem influência direta da altitude, predominando a estação de Garanhuns com 822m.

As médias mensais mais altas são registradas no período de novembro a março e as mais baixas entre maio e setembro. Elas apresentam uma amplitude de 7,7°C em torno de uma média anual de 25,5°C em Garanhuns, 3,4°C em torno de uma média anual de 28,9°C em Maceió e 6,9°C em torno da média anual de 30,2°C em Palmeira dos Índios. Os maiores valores das máximas temperaturas ocorrem no período de novembro a março e os menores valores entre maio a setembro.

Já as temperaturas mínimas possuem suas médias mensais registradas entre junho e setembro em Garanhuns, com média anual de 16,9°C, enquanto Maceió registra seus mínimos entre junho e setembro, com média anual de 21,6°C e Palmeira dos Índios com 20,1°C. A amplitude das temperaturas mínimas médias mensais é de 3,2°C em Palmeira dos Índios, 2,5°C em Maceió e 3,1°C em Garanhuns.

### **c) Umidade**

De acordo com Carvalho (2002), os valores obtidos nas três estações meteorológicas de Maceió, Palmeira dos Índios e Garanhuns, revelam que, durante todo o ano, Maceió e Garanhuns apresentam as médias mensais superiores a 75%, com máximos entre maio e agosto, em torno de 90%, sendo esse o período de máximas precipitações mensais. A mesma repartição ocorre em Palmeira dos Índios, porém com máximas em torno de 85% e mínimas entre outubro e janeiro em torno de 66%, refletindo o período de baixas precipitações totais mensais.

### **d) Hidrografia**

Segundo Gomes (2016) A bacia hidrográfica do Mundaú apresenta uma grande quantidade de ramificação em sua hidrografia, ou seja, trata-se de uma bacia bem drenada e classificada em sua hierarquia fluvial como de sétima ordem. Um fator determinante para que ela apresente essas características é a impermeabilidade das rochas presentes no Planalto da Borborema.

Em sua pesquisa, Gomes (2016) dá detalhes sobre as características das drenagens no alto médio e baixo curso da bacia em estudo:

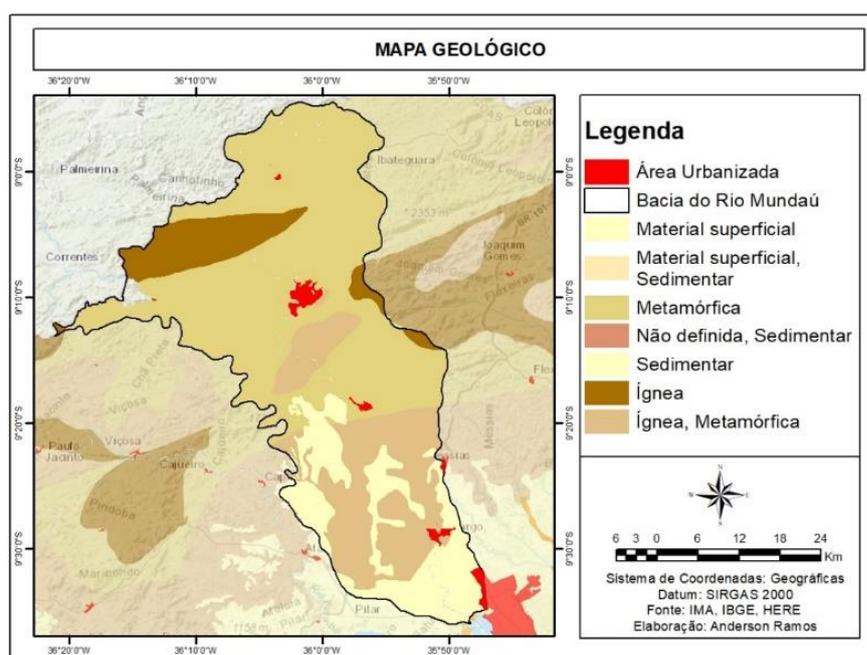
O mesmo ocorre nos padrões de drenagem das sub-bacias do alto curso (Alto Mundaú, Canhoto e Inhaúma), onde o arranjo espacial é influenciado pelo seu arcabouço estrutural, que possui a predominância de cristas e relevos residuais, apresentando um padrão de drenagem dendrítica, onde seus tributários se unem sem formar ângulos retos. Já o médio curso (sub-bacia do médio Mundaú) apresenta um padrão treliça de drenagem, estruturado no Complexo Belém do São Francisco, onde há uma predominância de rochas metamórficas e seu arcabouço é moderadamente a intensamente fraturado influenciando diretamente a disposição da rede de drenagem (GOMES, 2016).

### **e) Geologia e Geomorfologia**

Com relação a sua geologia, verifica-se que a maior parte da bacia hidrográfica do Mundaú no estado de Alagoas encontra-se localizada sobre rochas cristalinas (ígneas e metamórficas), cerca de 84% da área de estudo (Figura 12). Os outros 16% de seu

território estão situados sobre rochas sedimentares, localizadas abaixo da falha de borda no município de Rio Largo, no sentido do Complexo Estuarino Lagunar Mandaú-Manguaba.

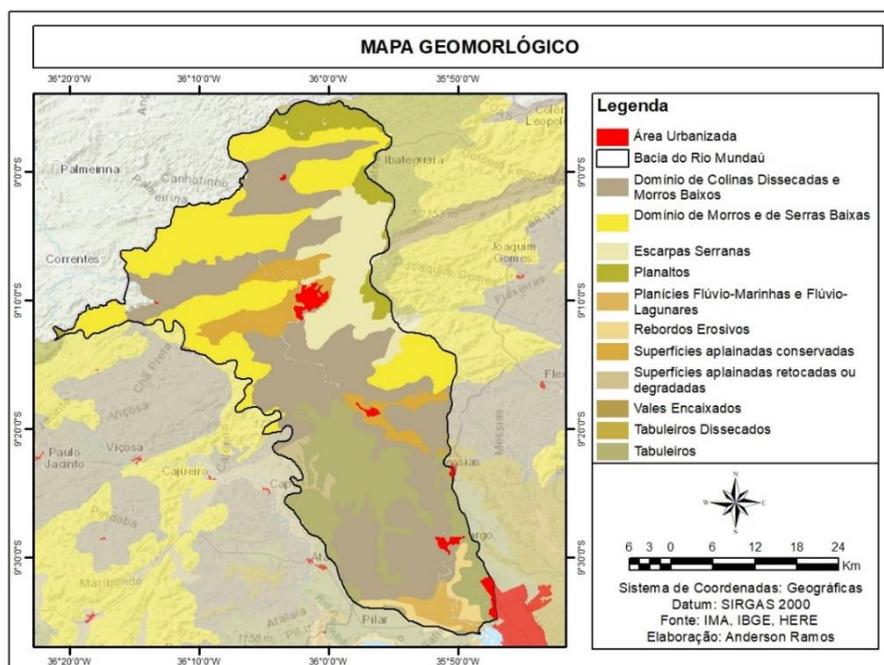
Figura 12: Mapa Geológico



Fonte: Base de dados vetorial IBGE, IMA e SEMARH, Autor 2020.

De acordo com dados do Instituto de Meio Ambiente de Alagoas – IMA/AL, A bacia hidrográfica estudada é geomorfologicamente composta principalmente por morros baixos. Na sua porção centro-sul, é possível identificar a presença de Tabuleiros. No centro-norte, é visível a presença de Escarpas Serranas e Planaltos (Figura 13).

Figura 13: Mapa Geomorfológico



Fonte: Base de dados vetorial IBGE, IMA e SEMARH, Autor 2020.

#### f) Vegetação e uso do solo

Segundo a Proposta de Instituição de Comitês de Bacia dos Rios Mundaú e Paraíba (2010), a área da bacia do Mundaú tem como feição fisiográfica uma faixa da zona da Mata Úmida na divisa entre Alagoas e Pernambuco. Ela segue dominante até a faixa litorânea, nas proximidades da foz do rio na laguna Mundaú. Por conta dessa feição, o padrão de ocorrência dos solos é homogêneo.

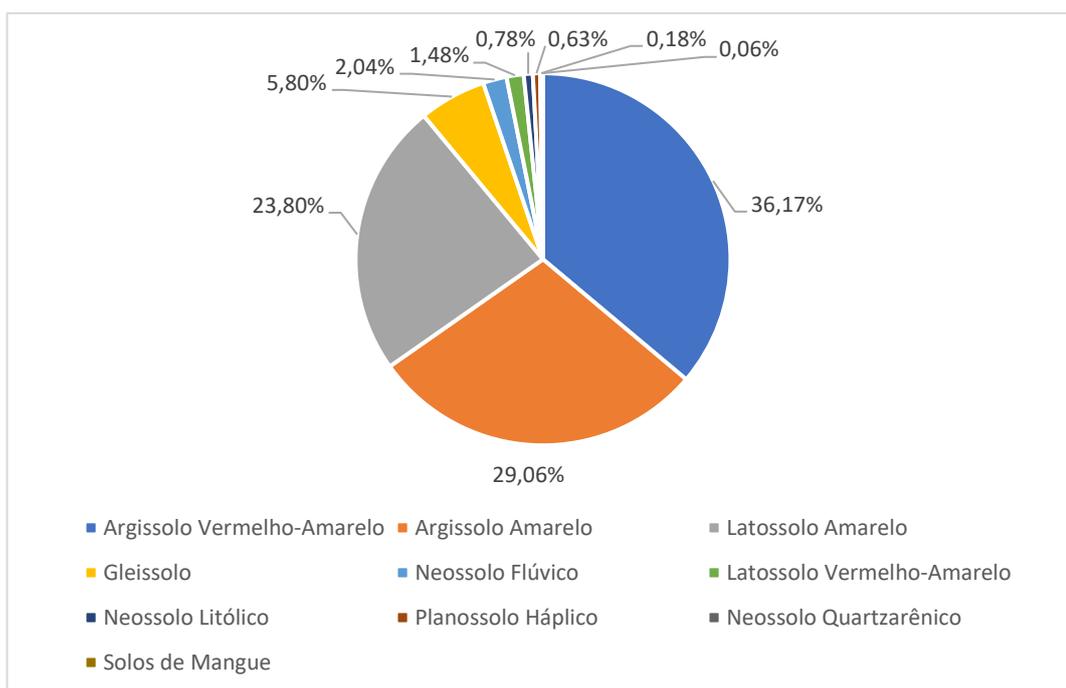
Segundo Marcuzzo (2011), a bacia do Rio Mundaú é caracterizada principalmente pela prática da agropecuária, enquanto menores porções da bacia são ocupadas por florestas, tais como: ombrófila aberta e estacional semi-decidual, ecótono, savana (estépica), água, influência urbana, vegetação secundária, dentre outras não classificadas. Economicamente, predominam a atividade sucroalcooleira e pastagens com criação de gado.

#### g) Solos

De acordo com o mapeamento de solos da Embrapa (2014), cerca de 89% dos solos da região são compostos por Argissolo Vermelho-Amarelo (36,17%), seguido

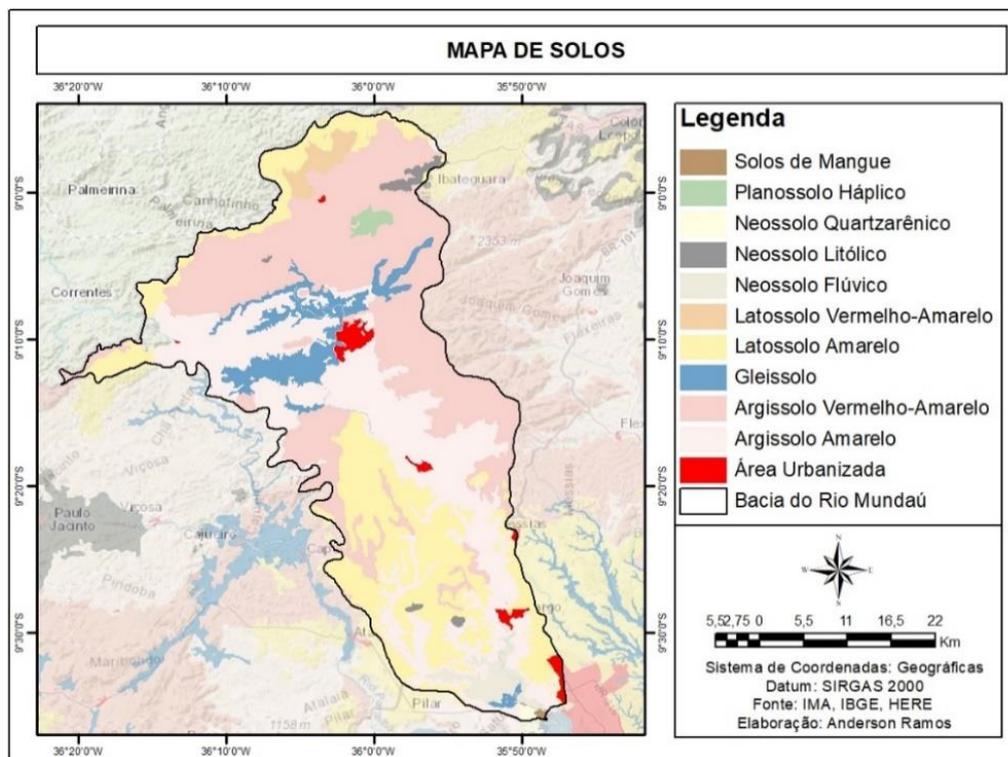
de Argissolo Amarelo (29,06%) e Latossolo Amarelo (23,80%), também foi verificada a presença de Gleissolos, Neossolo Flúvico, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico, Planossolo Háplico, Neossolo quartzarênico e solos de mangue, que juntos totalizam cerca de 11% (Figuras 14 e 15).

Figura 14: Quantificação de Solos



Fonte: Autor (2020), Embrapa (2014)

Figura 15: Mapa de solos



Fonte: Base de dados vetorial IBGE, IMA, EMBRAPA e SEMARH, Autor 2021.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Materiais

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados dados vetoriais nos formatos *shapefile* da Região Hidrográfica do Mundaú em Alagoas: Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, fornecidos pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH.

Também foram utilizados dados vetoriais nos formatos *shapefile* da malha municipal de Alagoas: Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE;

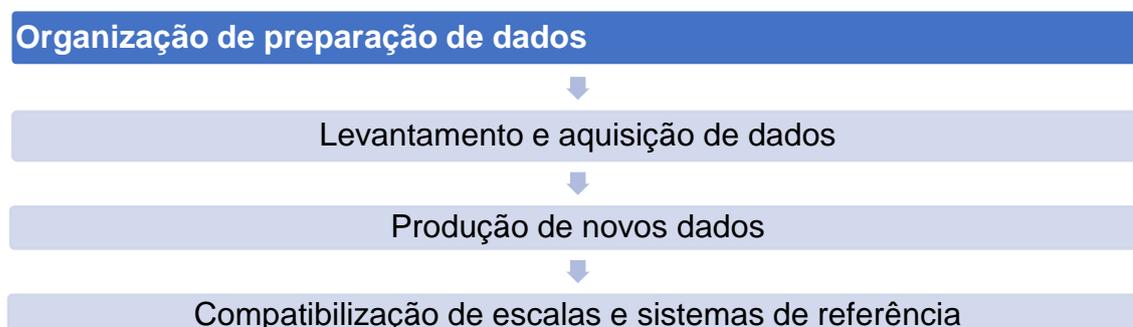
Os Dados matriciais foram do Satélite ALOS PALSAR da Bacia Hidrográfica do Mundaú em Alagoas: Sistema Geodésico de Referência WGS 84, fornecidos pela Alaska Satellite Facility - ASF.

## 5.2 Recursos tecnológicos e hardware

Para o desenvolvimento desta dissertação, foram utilizados os seguintes recursos tecnológicos:

- ❖ Software ArcGIS 10.5 para elaboração de banco de dados geográfico, produção de novos dados geográficos, compatibilização de escalas e produção de mapas;
- ❖ Software HAND Model, para elaboração do HAND. Fornecido do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE;
- ❖ Software Microsoft Office Excel 2015 para realização de cálculos matriciais, bem como para a geração de gráficos e tabelas;
- ❖ Hardware: Notebook Lenovo com sistema operacional Windows 10 de 64 bits, processador Intel core i5 de 1,80 GHz e memória RAM de 8 GB.

## 5.3 Fluxograma de atividades realizadas





## 5.4 Métodos

Inicialmente foram coletados dados vetoriais e matriciais, disponibilizados através de órgãos públicos, tais como: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas - SEMARH-AL e Alaska Satellite Facility - ASF.

Entre os dados vetoriais que foram coletados, constam arquivos em formato *shapefile* (ESRI), Limite da Bacia Hidrográfica do Mundaú e Limites municipais.

Quanto aos dados matriciais coletados, ou seja, as imagens do Satélite Alos Palsar, foi possível e necessário produzir outros produtos cartográficos, em escala de 1:62500, que posteriormente foram utilizados como variáveis importantes na composição da álgebra de mapas. São eles: Drenagem, Modelo Digital de Elevação – MDE, Distância à Drenagem Mais Próxima ou HAND e Declividade em percentual do Relevo, com resolução espacial de 12,5m, ou seja, cada pixel da imagem consegue

representar até 12,5m do território. Vale ressaltar que, inicialmente todos os planos de informação foram reprojatados para o Sistema de Referência Geodésico SIRGAS 2000 fuso 25 S.

Tais critérios foram selecionados a partir da extensa revisão bibliográfica, onde foram identificadas variáveis impactantes na ocorrência de inundações. Estas são amplamente citadas por diversos autores, e principalmente através na nota técnica de para elaboração de modelagens de inundação (CPRM, 2021).

É bastante comum, no mapeamento de vulnerabilidade a inundação, os autores utilizarem as variáveis: Uso do solo, Solo, Geologia, Geomorfologia, Declividade, Altitude, Drenagem. No entanto, a nota técnica da CPRM (2021) traz a utilização apenas de variáveis topográficas, tais como: Altitude, formas de Relevo e HAND. O que resulta em um modelo de mancha de inundação, que não interfere nas condições temporais ou hidrológicas.

Durante os testes que foram realizados foi verificado que as o modelo representava um resultado mais próximo da realidade com a utilização das variáveis: Declividade, HAND e Altitude.

A identificação e mapeamento dos padrões de relevo também é uma variável importante a ser analisada, considerando que fenômenos de inundação em geral ocorrem em locais específicos. Normalmente, áreas de inundação são aquelas que geomorfologicamente estão suscetíveis a transbordamentos dos rios.

Segundo a Nota Técnica (CPRM, 2021) para elaboração de modelagens de inundação, regiões como Planície de Inundação, Planícies Fluvioamarinhas, Planícies Fluvioacustres e Planícies Marinhas têm uma alta suscetibilidade à inundação. No entanto, nesta pesquisa, para efeito de mapeamento, foi analisada toda a Planície de Inundação do rio Mundaú e Canhoto, na bacia do Mundaú em Alagoas, justamente por coincidir com as áreas de ocupação urbana. Porém, a Planície de Inundação, não recebeu nenhum peso, pois, como foi mapeada apenas uma forma de relevo e a mesma possui uma grande relevância, durante os testes, houve um resultado superestimado, sendo assim, não foi considerada na álgebra, se resumindo a delimitação da área de modelagem, ou seja, ela não influenciou diretamente no resultado.

Os dados foram inseridos no banco de dados geográfico, atribuindo notas a cada plano de informação analisado, a partir do uso da ferramenta *Reclassification*, que serve para normalizar os dados dos diferentes planos de informação. As notas variam de 1 a 3, onde as regiões que receberam nota 3 foram as áreas com maior possibilidade de ocorrência de inundação e 1 são as áreas com menor possibilidade. Por exemplo, a altitude não será mais analisada em metros, e sim, em valores que vão de 1 a 3, onde 3 representa as áreas mais baixas, 2 as áreas de média altitude e 1, as áreas mais altas. No caso da declividade, as áreas com até 6%, receberam nota 3, de 6% a 12%, nota 2, e acima de 12%, receberam nota 1. Já no caso do HAND, os valores mais próximos de zero recebem nota 3, valores intermediários, nota 2, e valores mais altos, nota 1.

Após a atribuição das notas, foram definidos os pesos para cada critério, levando em consideração a relevância para a ocorrência de inundações. Estes foram definidos de acordo com o levantamento bibliográfico. Neste caso, foi definido que a Declividade e o HAND, são equivalentes quanto a sua importância para ocorrência do evento de inundação, e receberam peso 0,45. Já a Altitude, recebeu um peso menor, 0,1, porque neste caso a área de análise representa a região de médio e baixo curso da bacia, ou seja, diminuiu-se o seu peso, para que o alto curso da bacia em Alagoas fosse bem representado quanto a sua vulnerabilidade.

Em seguida, na etapa de álgebra de mapas, foram cruzados todos os planos de informação de acordo com as notas e a hierarquia de importância (pesos). Esse procedimento foi realizado por meio da ferramenta raster calculator, utilizando a fórmula abaixo:

$$MVI = 0,1 * \text{Altitude} + 0,45 * \text{Declividade} + 0,45 * \text{HAND}$$

Onde, MVI = Mapa de Vulnerabilidade a Inundação;

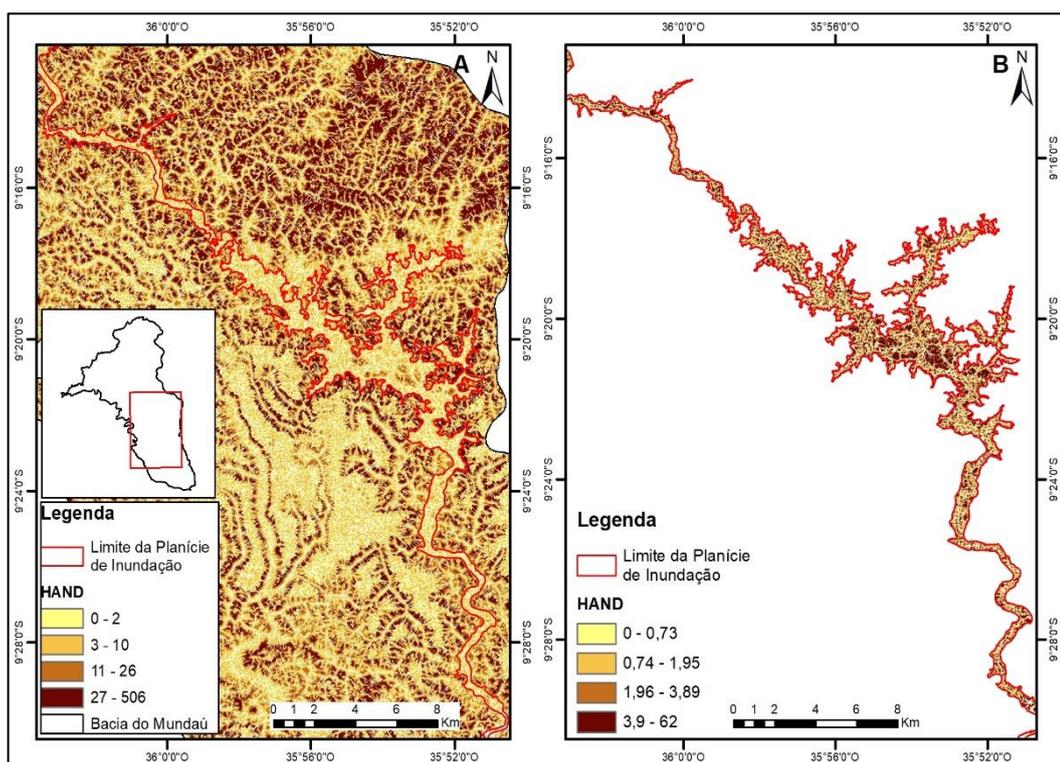
Em seguida, na etapa de validação, foram analisados os resultados, a fim de verificar se os mesmos estavam condizentes com a realidade das áreas atingidas anteriormente por outras enchentes. Com isso, foi necessário recalibrar o modelo para que os resultados fossem mais fidedignos. Por fim, realizou-se novamente a álgebra de mapas, que trouxe como resultado um novo mapa de vulnerabilidade à inundação. Vale lembrar que essa etapa pode ser realizada por diversas vezes, sempre em busca de um cenário que se aproxime ao máximo dos já verificados na prática.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Height above the rearest drainage – HAND

O HAND do Rio Mundaú em Alagoas, foi realizado através do software HAND Model, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2021). A figura 16 apresenta informações sobre a diferença de altura entre a drenagem e as áreas vizinhas, ou seja, as regiões em tons mais claros, apresentam áreas em cotas próximas de zero, o que quer dizer que em uma inundação as regiões mais claras seriam facilmente atingidas. Já as áreas mais escuras, possuem uma diferença de altura maior, e por isso, possuem baixa probabilidade de serem alcançadas pelo nível do rio durante a inundação.

Figura 16: (A) Modelo HAND sob os limites do relevo suscetível. (B) HAND classificado de acordo com a suscetibilidade a inundações e recortado pelos padrões de relevo suscetíveis

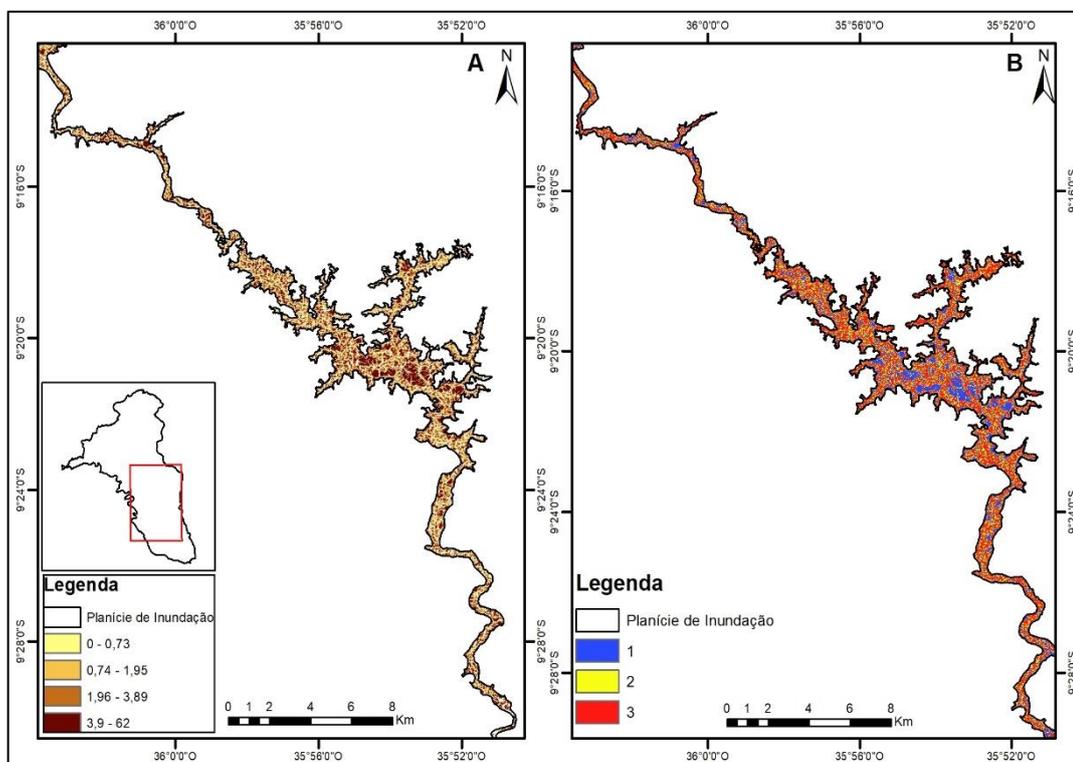


Fonte: o autor (2021)

O HAND recortado através dos limites da área de suscetibilidade à inundação (Figura 16) permitiu que fosse realizada uma reclassificação dos valores com notas que variaram de 1 a 3, onde as regiões que receberam nota 3 foram as áreas com

maior possibilidade de ocorrência de inundação e a 1 são as áreas com menor possibilidade, como pode ser visto no quadro (B) da figura 17.

Figura 17: Reclassificação de valores de acordo com a suscetibilidade à inundação



Fonte: o autor (2021)

## 6.2 Formas de relevo

As regiões de Planície de Inundação foram mapeadas, no intuito de delimitar a área de modelagem, em outras palavras, ela por si só já apresenta áreas de suscetibilidade à inundação.

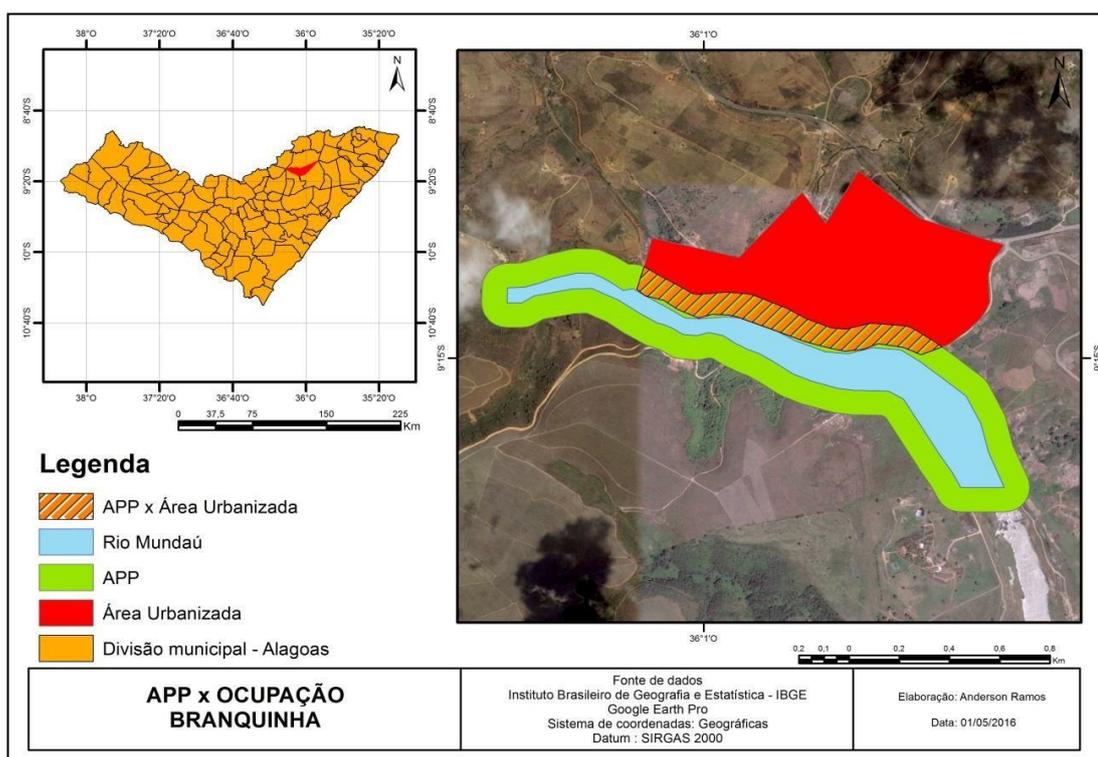
Toda a ocupação irregular, da Planície de Inundação, pode ser notada por meio dos mapas baseados no Art.4º, parágrafo único, I, da lei nº 12.651, onde se considera Área de Preservação Permanente (APP) em zonas rurais ou urbanas as áreas marginais de qualquer curso d'água natural, desde a sua margem, em largura mínima de: a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura; b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura; c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura; d) 200 (duzentos) metros, para

os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura e 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros.

Dito isso, é possível verificar que todas as sedes municipais estão instaladas junto ao rio Mundaú e Canhoto, estes que são classificados pela ANA como rios de alta vulnerabilidade a inundações.

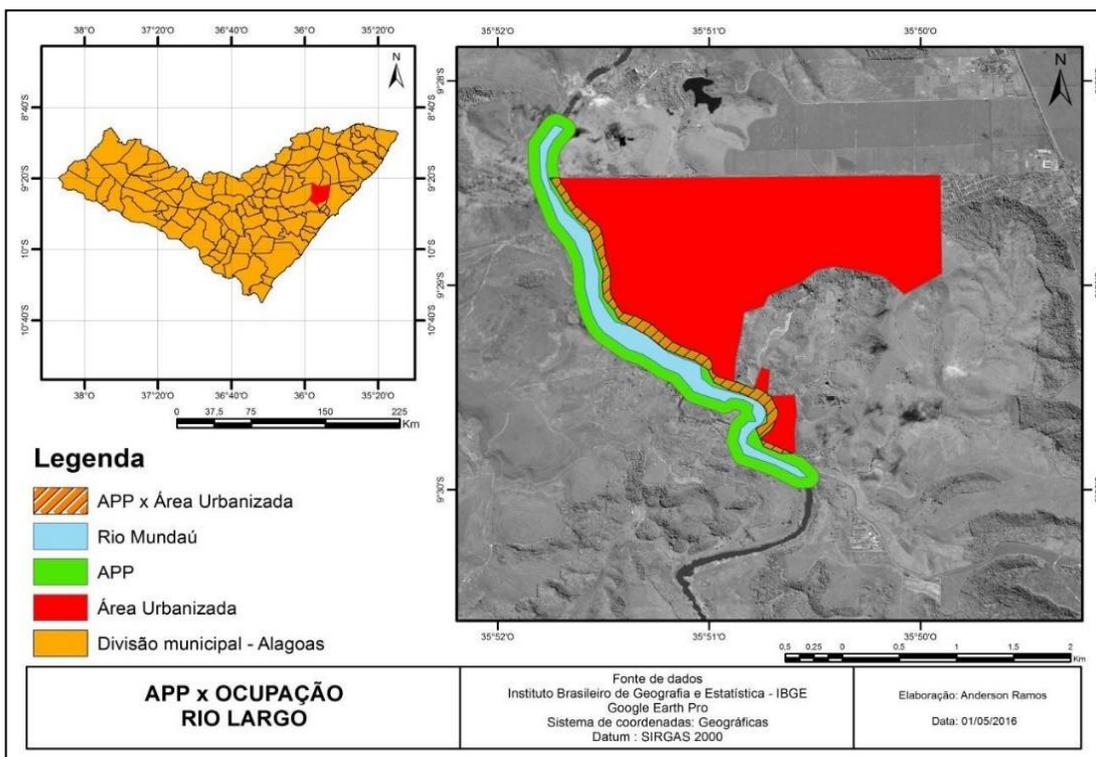
Sendo assim, a ocorrência de altos volumes de chuva em curto espaço de tempo pode facilmente causar o aumento da vazão, a ponto de provocar uma inundação e atingir a população que vive na Planície de Inundação. Isso pode ser observado nas figuras 18 a 24.

Figura 18: APP vs. Ocupação em Branquinha



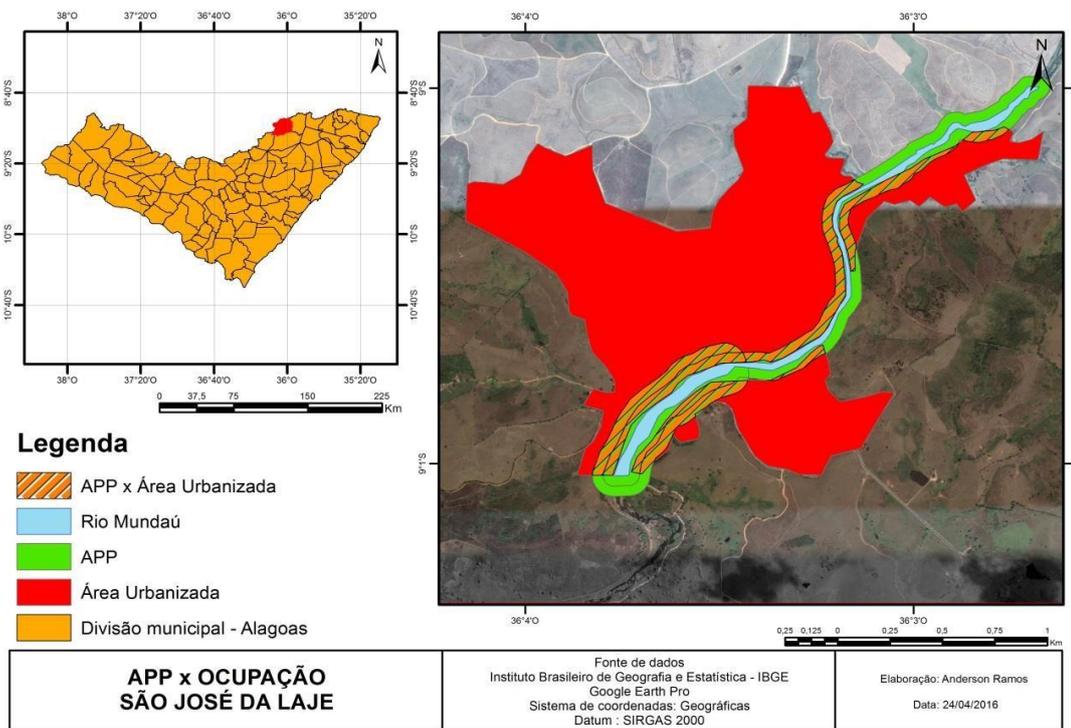
Fonte: Base de dados vetorial IBGE e Google Earth, Autor (2016)

Figura 19: APP vs. Ocupação em Rio Largo



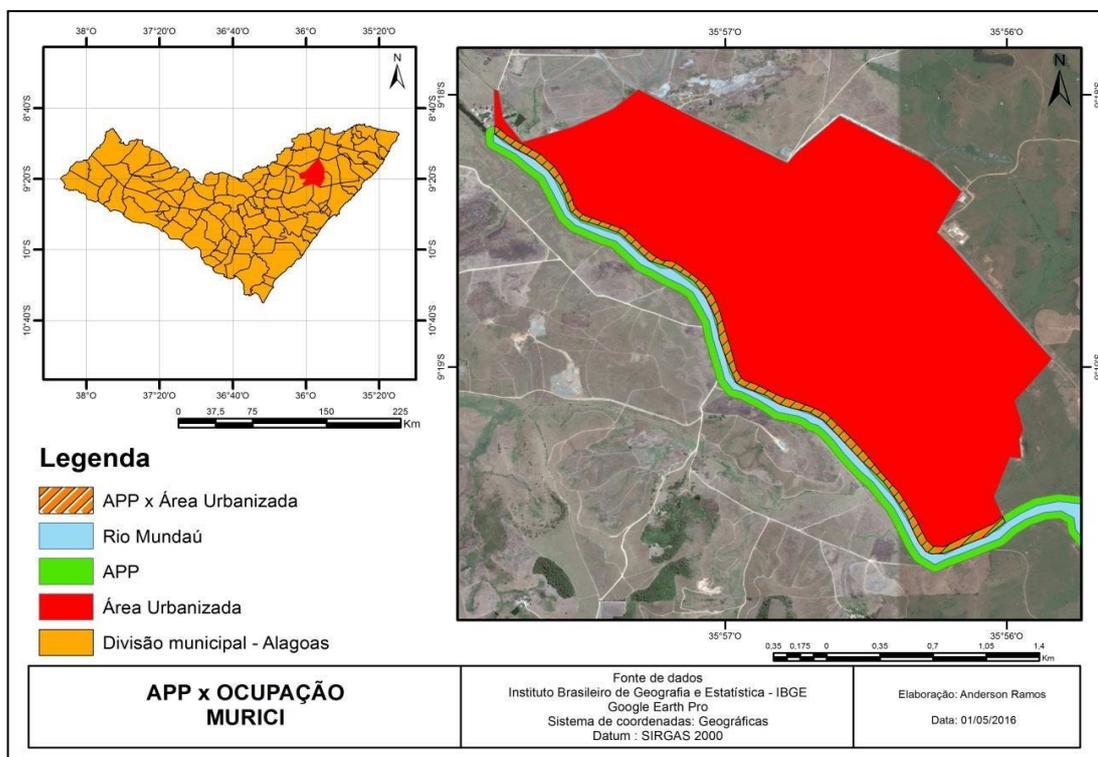
Fonte: Base de dados vetorial IBGE e Google Earth, Autor (2016)

Figura 20: APP vs. Ocupação em São José da Laje



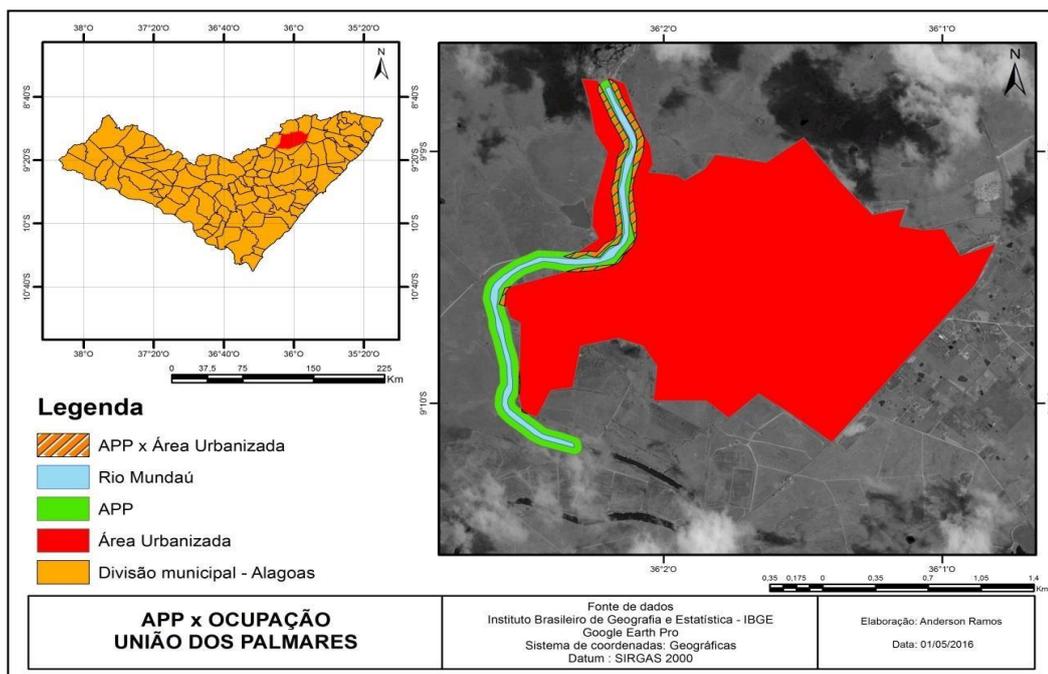
Fonte: Base de dados vetorial IBGE e Google Earth, Autor (2016)

Figura 21: APP vs. Ocupação em Murici



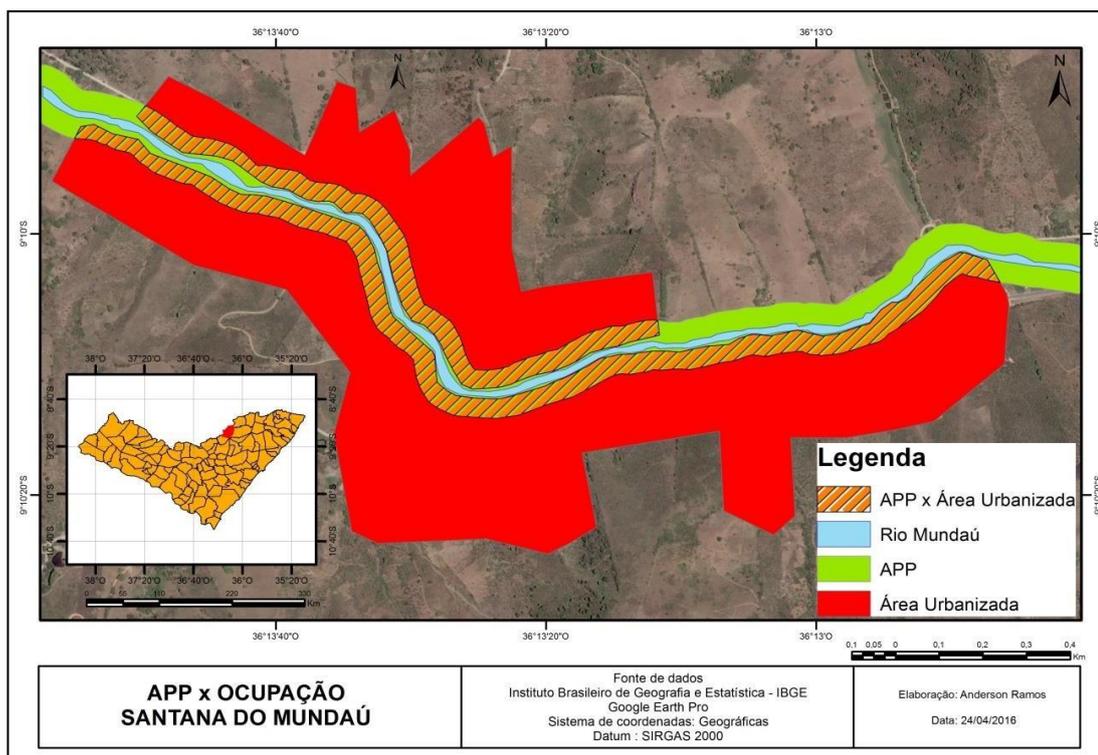
Fonte: Base de dados vetorial IBGE e Google Earth, Autor (2016)

Figura 22: APP vs. Ocupação em União dos Palmares



Fonte: Base de dados vetorial IBGE e Google Earth, Autor (2016)

Figura 23: APP vs. Ocupação em Santana do Mundaú



Fonte: Base de dados vetorial IBGE e Google Earth, Autor (2016)

Figura 24: Altura alcançada pelo rio Mundaú durante a cheia de 2010



(a)

(b)

(c)

A) São José da Laje, b) Rio Largo, c) União dos Palmares.

Fonte: Lab. Geologia, Acervo LABMAR/ PIBIC/UFAL 2010/2011.

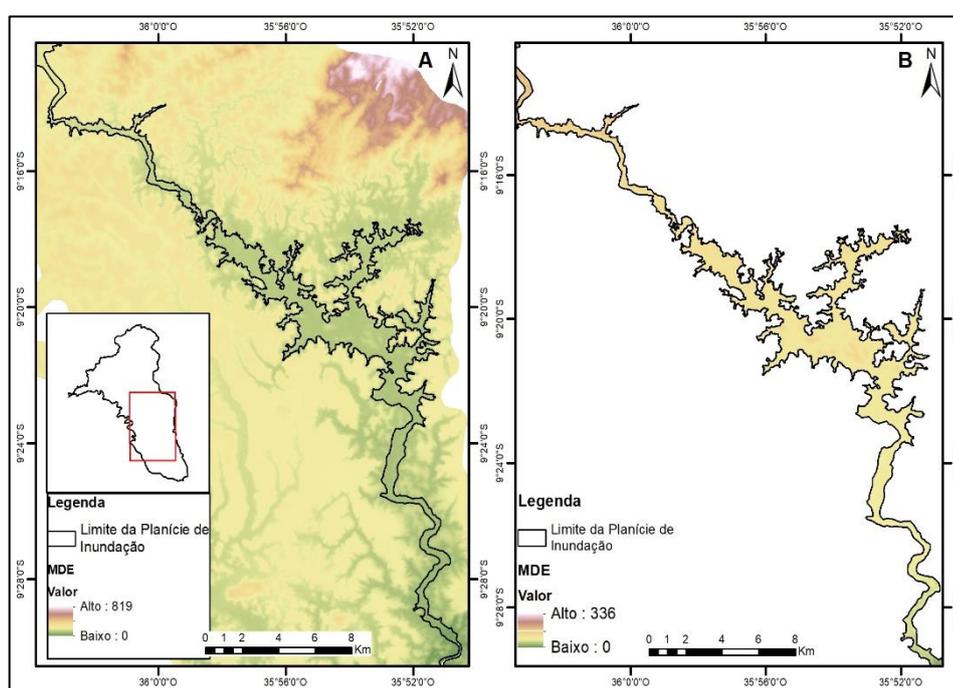
### 6.3 Altitude

A altitude também foi analisada como uma das principais variáveis para composição do modelo de inundação, sobretudo nas áreas de planície. Regiões mais altas e íngremes possuem uma baixa probabilidade de inundação justamente devido

à lei da gravidade, que direciona a água para regiões de acumulação, ou seja, áreas mais baixas.

A figura 25 (A), apresenta um recorte do Modelo Digital de Elevação da bacia. Nela, as áreas esverdeadas são as áreas mais baixas. Já as áreas avermelhadas são regiões mais altas, ou seja, nesse sentido há um fluxo de drenagem no sentido sudoeste, que direciona as águas das vertentes para as Planícies de Inundação.

Figura 25: Mapa de Altitude, recorte da bacia do Mundaú em Alagoas



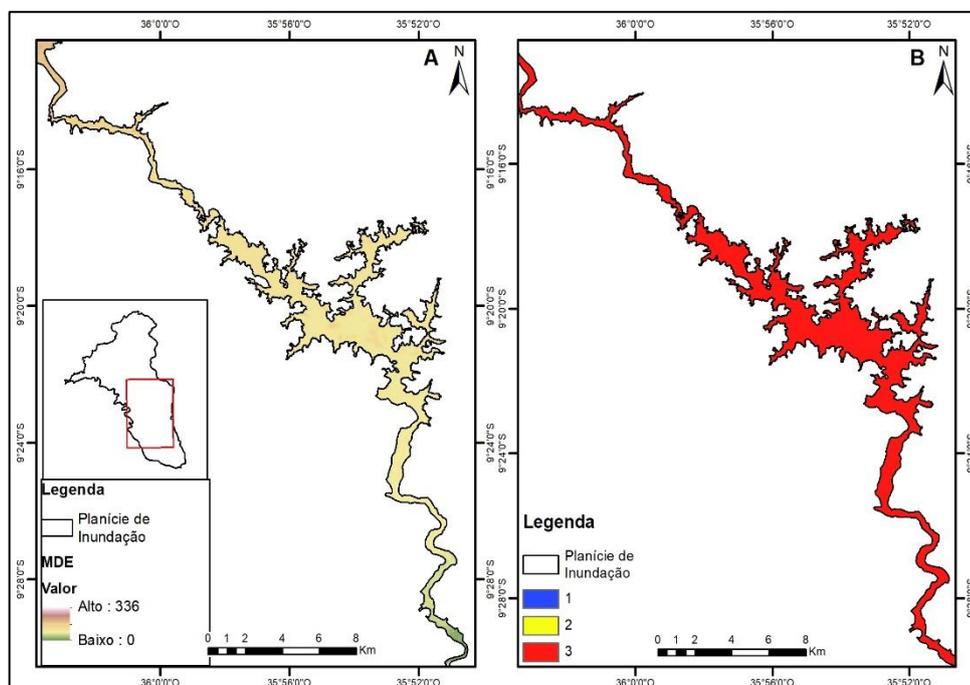
Fonte: o autor (2021)

Já na figura 25 (B), é possível verificar que o trecho da Planície de inundação em destaque apresenta uma cor amarelada, ou seja, trata-se de uma área com altitude média. É importante realizar esse recorte da área de inundação pois há variações de altura que podem ser significativas dentro da área estudada. No entanto, é importante salientar que a área de estudo é restrita a Alagoas e que o alto curso da bacia em Alagoas corresponde ao médio-baixo curso da bacia como um todo.

Ao realizar a reclassificação da altitude restrita, como mostra a figura 26 (B), a Planície de Inundação, as áreas mais baixas recebem uma nota 3, que corresponde

a áreas com maior suscetibilidade à inundação. As regiões com altitude intermediária recebem nota 2 e as áreas mais baixas, nota 1.

Figura 26: Reclassificação do mapa de Altitude



Fonte: o autor (2021)

## 6.4 Declividade

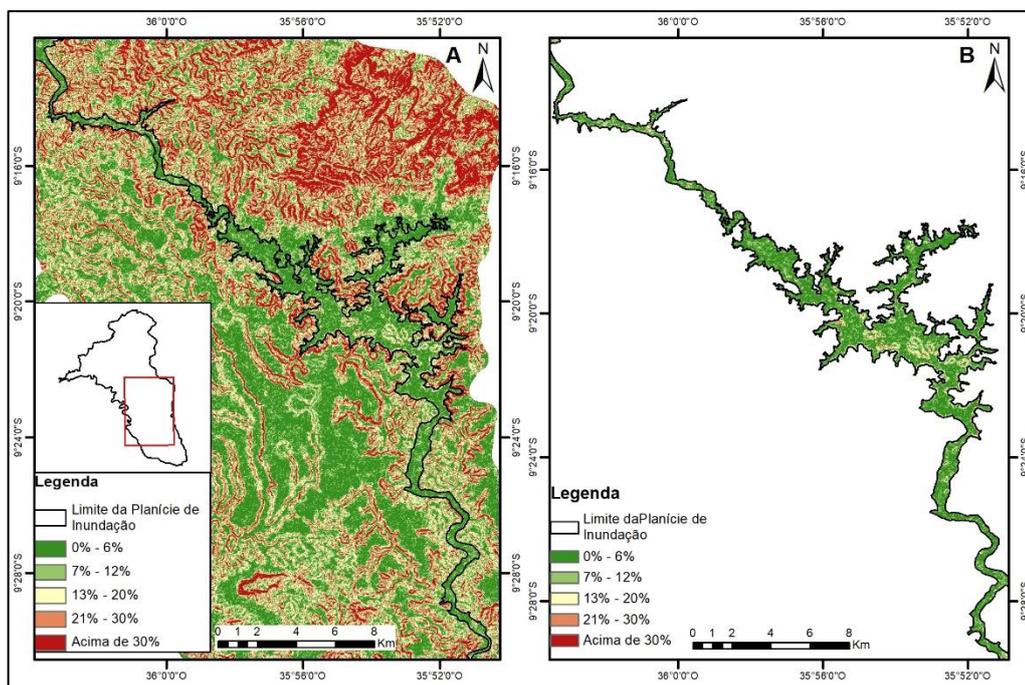
A Declividade em percentual de relevo tem se mostrado um dado importante em mapeamentos de vulnerabilidade e inundação. Por isso, tem sido utilizada como variável componente de modelagens como a desenvolvida ao longo desta pesquisa.

Desta forma, as classes de declividade foram definidas em 5 categorias, de acordo com as orientações de Ross (1992). São elas: até 6%; de 6% a 12%; de 12% a 20%; de 20% a 30% e acima de 30%. Utilizando as imagens do satélite ALOS/PALSAR, foi possível gerar o mapa de declividade em percentual de relevo de acordo com as orientações acima citadas.

Por meio da figura 27, é possível perceber que a planície de inundação foi destacada sobre o mapa de declividade em percentual de relevo. Além disso, pode-se observar que grande parte dessas áreas delimitadas pela planície de inundação

possuem declividade de até 6%. Nesse sentido, de acordo com Conceição (2019), áreas mais aplainadas (baixa declividade), ou seja, com declividade de até 6%, são mais suscetíveis à inundação. Sendo assim, as áreas mais aplainadas receberão uma nota 3, indicando maior suscetibilidade à inundação, enquanto as áreas mais íngremes (acima de 30%) receberam nota 1, pela sua baixa suscetibilidade a este fenômeno (Figura 28).

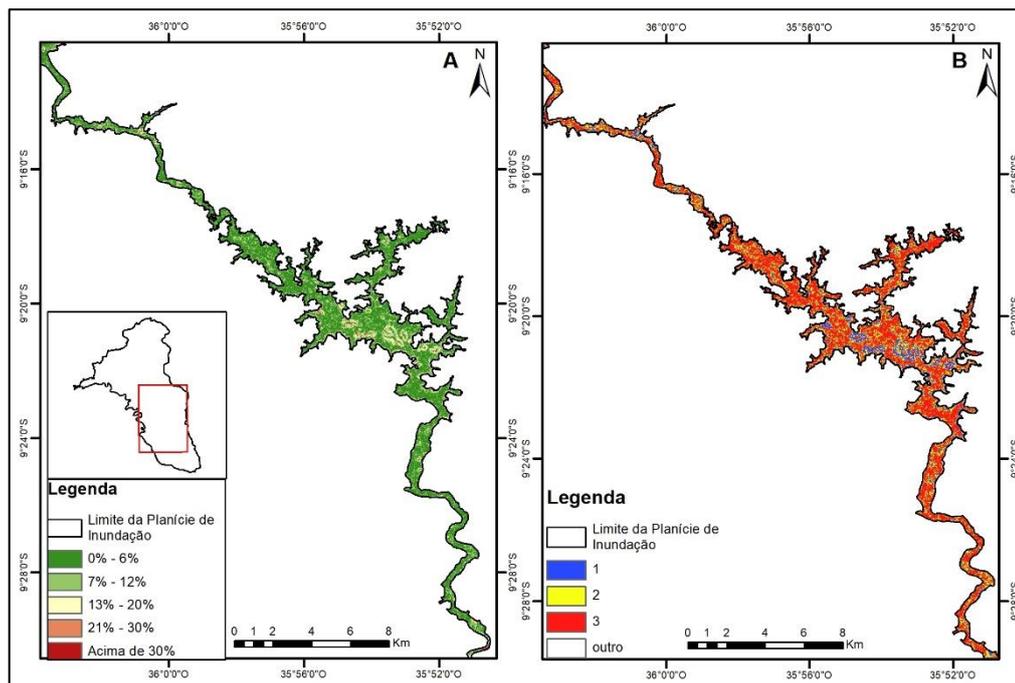
Figura 27: Mapa em Declividade Percentual de Relevo com destaque para a planície de inundação



Fonte: o autor (2021)

Figura 28: (A) Declividade em percentual de relevo restrito à área de inundação. (B) Reclassificação

de vulnerabilidade a ocorrência de fenômenos de inundação

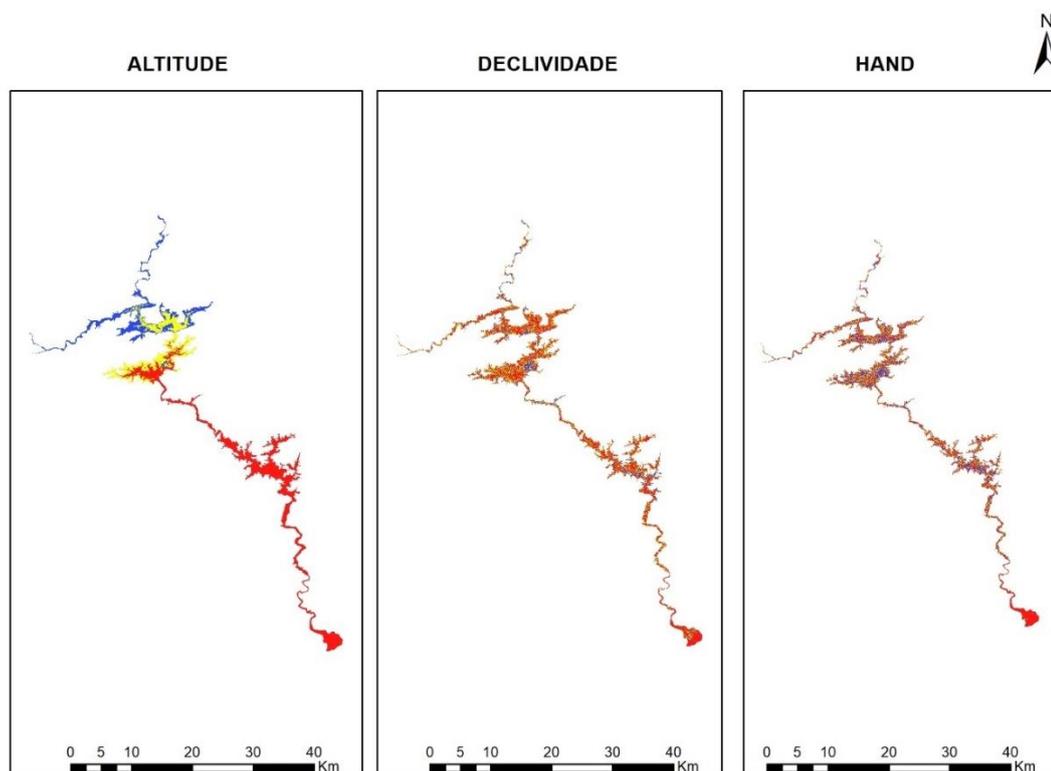


Fonte: o autor (2021)

## 6.5 Álgebra de Mapas

Com a integração das variáveis analisadas (Figura 29), foi possível realizar o mapeamento de vulnerabilidade à inundação ao longo de todo o curso dos rios Mundaú e Canhoto, em Alagoas.

Figura 29: Integração das variáveis

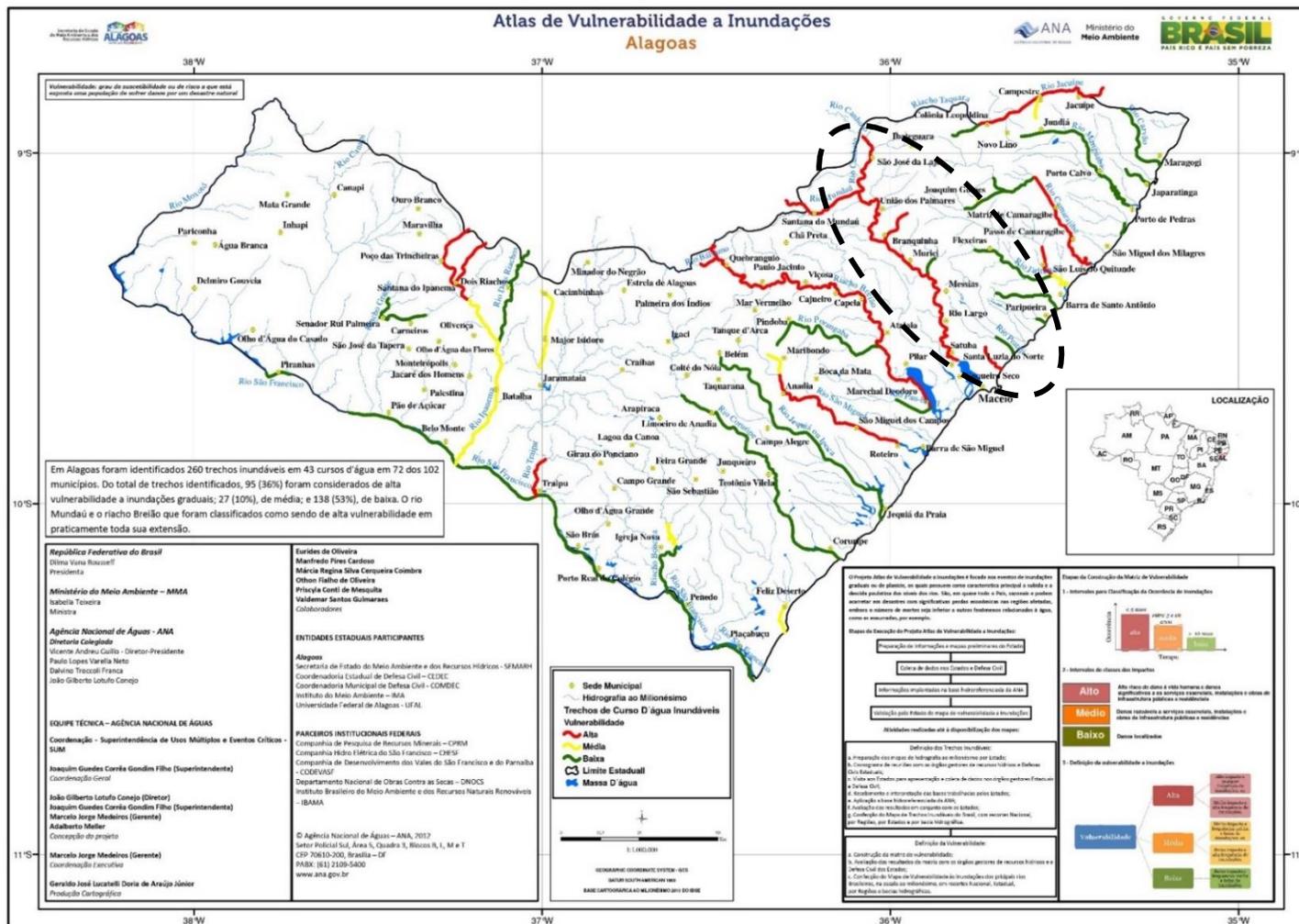


Fonte: o autor (2021)

A partir da álgebra de mapas, foi possível mapear toda a área estudada de forma coerente com os eventos de enchente que já ocorreram na bacia do Mundaú, bem como, com os poucos mapeamentos e estudos que já existem na região.

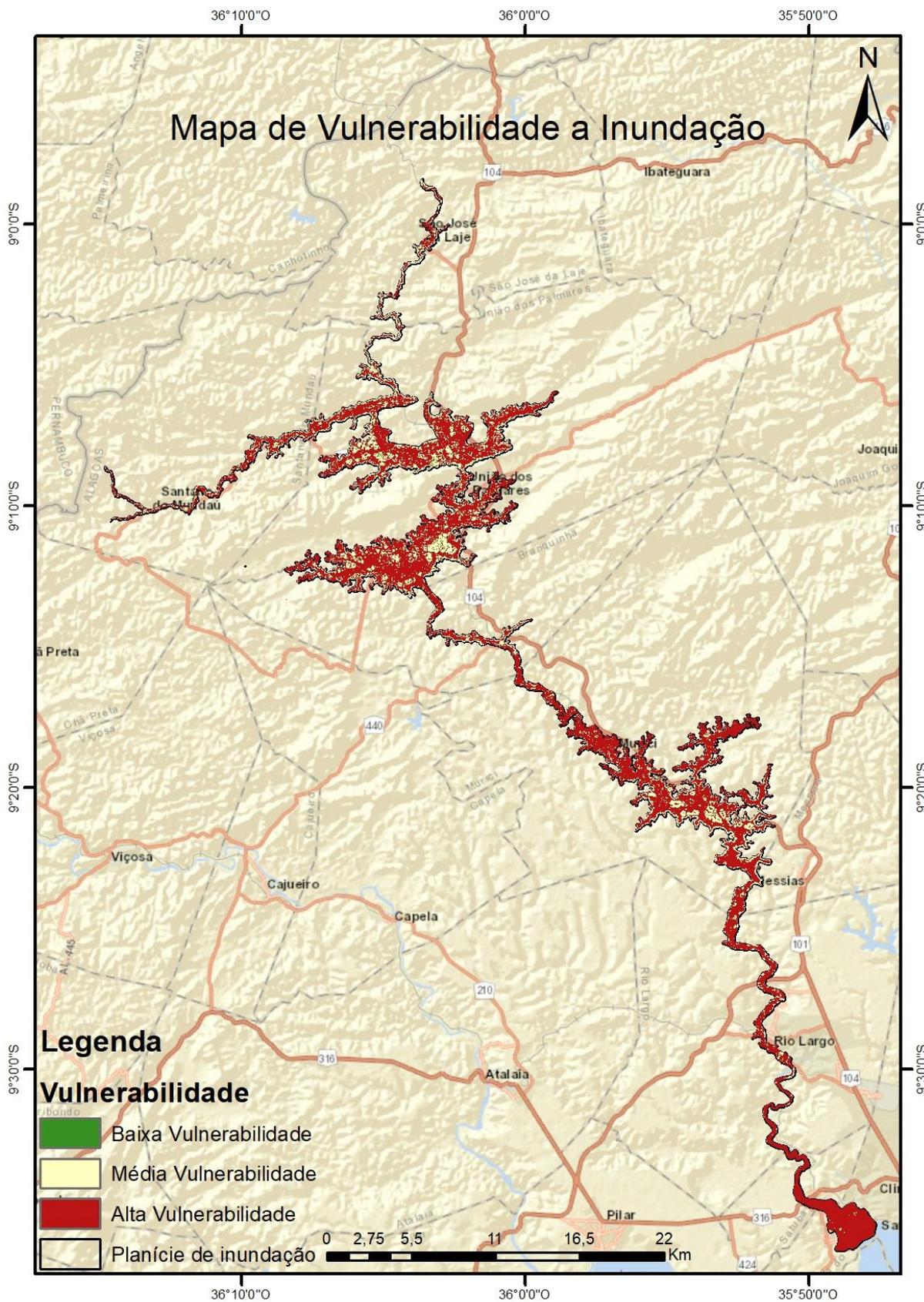
A Agência Nacional de Águas (2014), realizou um mapeamento que visa apresentar um panorama da frequência de eventos de inundações que já aconteceram nos municípios brasileiros. Nesse mapeamento, todo o rio Mundaú e Canhoto foram classificados como rios de alta vulnerabilidade a inundações (figura 30), o que contribui com o resultado do mapeamento realizado através do método AHP (Figura 31).

Figura 30: Atlas de Vulnerabilidade a Inundações



Fonte: ANA (2014)

Figura 31: Mapa de Vulnerabilidade à inundação



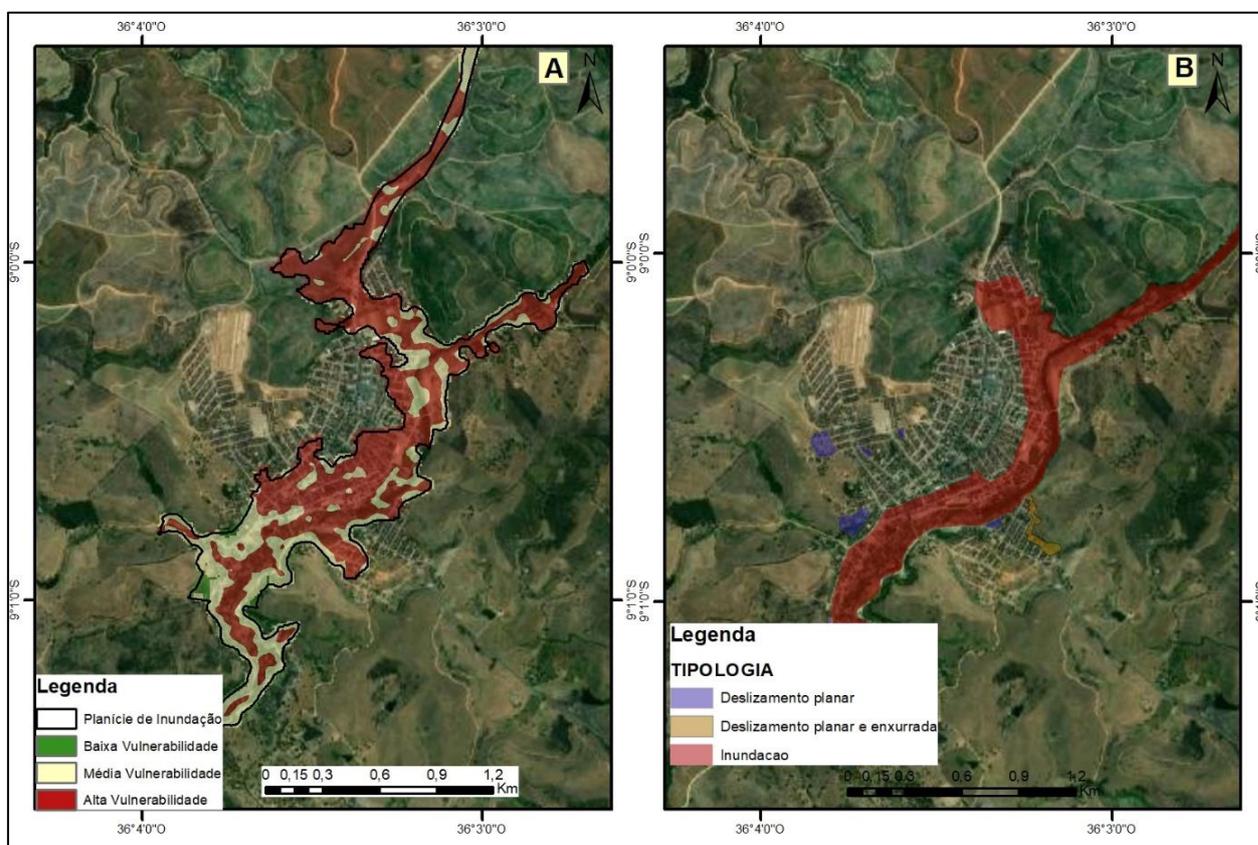
Fonte: o autor (2021)

### a) São José da Laje

Como pode ser visto por meio da figura 32 (A), a mancha de inundação, que em sua maioria é classificada como sendo de alta vulnerabilidade, recobre uma extensa área de ocupação no município de São José da Laje, uma área maior do que a apresentada na figura 32 (B), realizada pela CPRM em 2013. No entanto, em ambos os mapas, é demonstrada a alta vulnerabilidade à inundação às margens do rio Canhoto, ou seja, há consistência no resultado da modelagem a inundação realizada através do método AHP.

Neste caso a CRPM realizou o mapeamento através de trabalhos de campo, em contato com moradores da região, para identificar as áreas atingidas durante a enchente de 2010.

Figura 32: (A) Modelagem inundação de São José da Laje - AHP. (B) Modelagem a Inundação de São José da Laje – CPRM (2013)



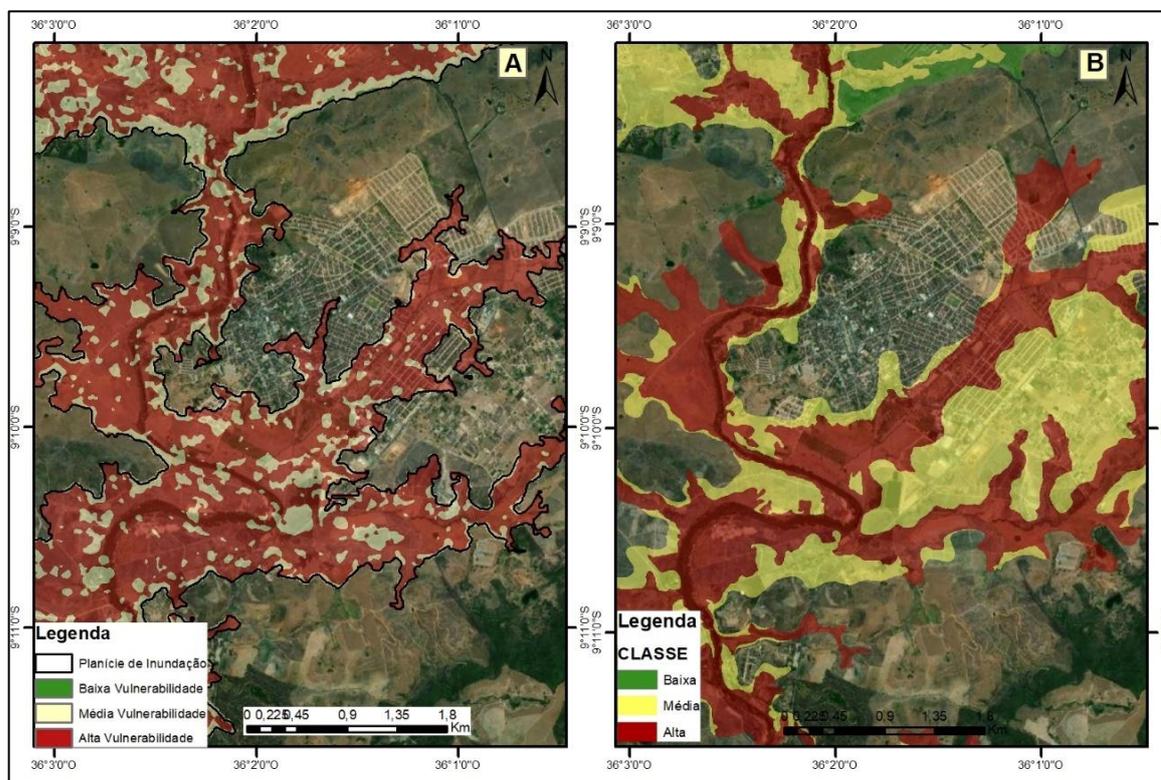
Fonte: o autor (2021), CPRM (2013)

## **b) União dos Palmares**

A figura 33 apresenta a modelagem realizada com foco na área urbana do município. As áreas mapeadas em ambos os quadros (A e B) têm uma semelhança quanto ao mapeamento das áreas suscetíveis. No entanto, nessas áreas, a modelagem do quadro (A), foi classificada em sua maioria como de alta vulnerabilidade e pequenas áreas foram classificadas como média vulnerabilidade. Já no quadro (B), a modelagem realizada pela CPRM coincide, sobretudo nas áreas classificadas como alta vulnerabilidade no quadro (A), porém apresenta áreas de média vulnerabilidade mais extensas.

O fato do mapa da CPRM ter apresentado áreas de média vulnerabilidade mais extensas não representa um erro na modelagem do quadro A. Como a modelagem do quadro A, foi delimitada com a Planície de Inundação, os resultados estão contidos nessa área. Vulnerabilidade à inundação em outras formas de relevo não foram objeto desta dissertação.

Figura 33: A) Modelagem inundação de União dos Palmares - AHP. (B) Modelagem a Inundação de União dos Palmares – CPRM (2014)

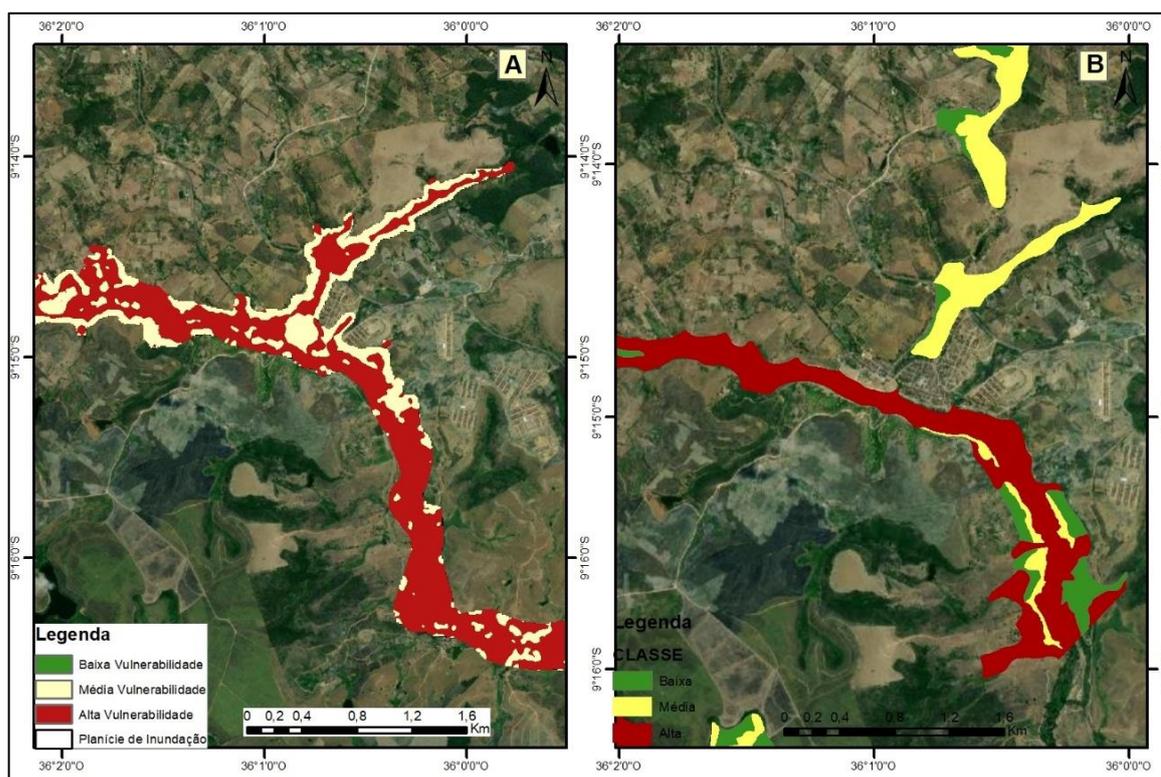


Fonte: o autor (2021), CPRM (2014)

### c) Branquinha

Na modelagem a inundação (Figura 34), é possível perceber que praticamente todo o curso do rio mundaú que margeia a cidade de Branquinha foi classificado como sendo de alta vulnerabilidade em ambos os cenários (A e B). Os resultados se diferenciam no afluente que segue no sentido nordeste, visto que na modelagem (A) foi classificado como sendo de alta e média vulnerabilidade e, no quadro (B), sendo média vulnerabilidade. No entanto, este afluente já foi classificado pela CPRM como sendo de alta vulnerabilidade em 2012.

Figura 34: A) Modelagem inundação de Branquinha - AHP. (B) Modelagem a Inundação de Branquinha – CPRM (2014).



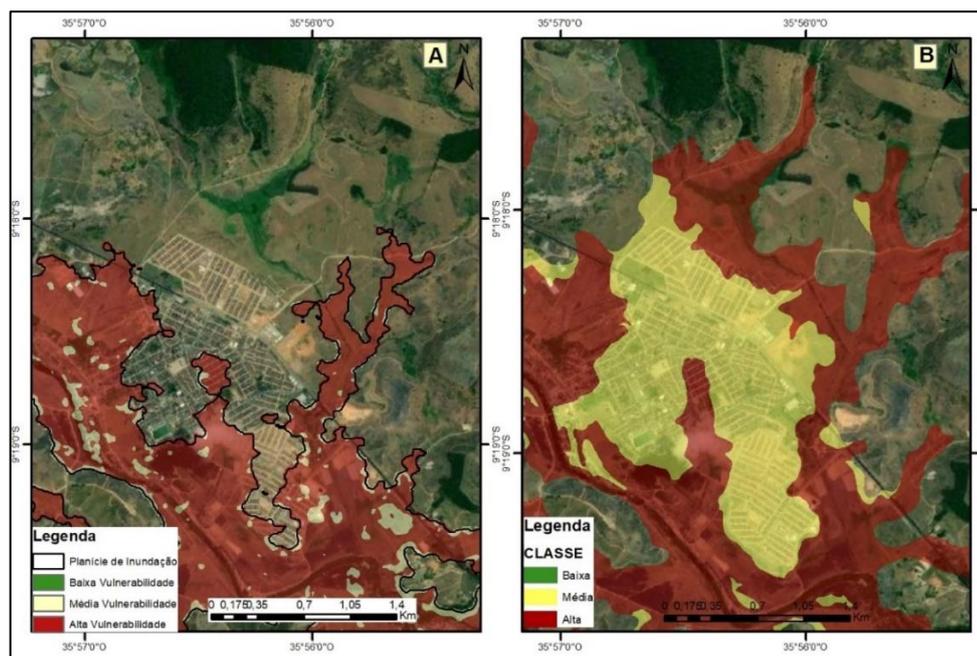
Fonte: (A) o autor (2021), (B) CPRM (2014).

#### d) Murici

Quanto à modelagem de inundação, a cidade de Murici também apresenta uma extensa área de vulnerabilidade, no sentido norte-sul, principalmente na margem esquerda, que é justamente onde há ocupação urbana (Figura 35). No quadro (A), as áreas mapeadas foram classificadas principalmente como sendo de alta vulnerabilidade e coincidem, com certa variação, com as áreas de alta vulnerabilidade mapeadas no quadro (B). No entanto, o quadro (B) apresenta uma área de média vulnerabilidade bastante extensa e que recobre maior porção da área urbana da cidade, inclusive a área que foi destinada para construção das novas habitações após a cheia de 2010. Ou seja, o mapa do quadro (A) realizado através do método AHP foi assertivo quanto às áreas de alta vulnerabilidade, porém conservador nas áreas de média vulnerabilidade. Vale lembrar que, com o trabalho de campo, é possível identificar possíveis distorções e recalibrar o modelo para que reflita mais fielmente a realidade do local.

A conversa com moradores da região pode ser também um instrumento para validar as cotas de inundação já alcançadas anteriormente, e com isso, incluir ou retirar áreas suscetíveis.

Figura 35: (A) Modelagem inundação de Murici - AHP. (B) Modelagem a Inundação de Murici – CPRM (2014)

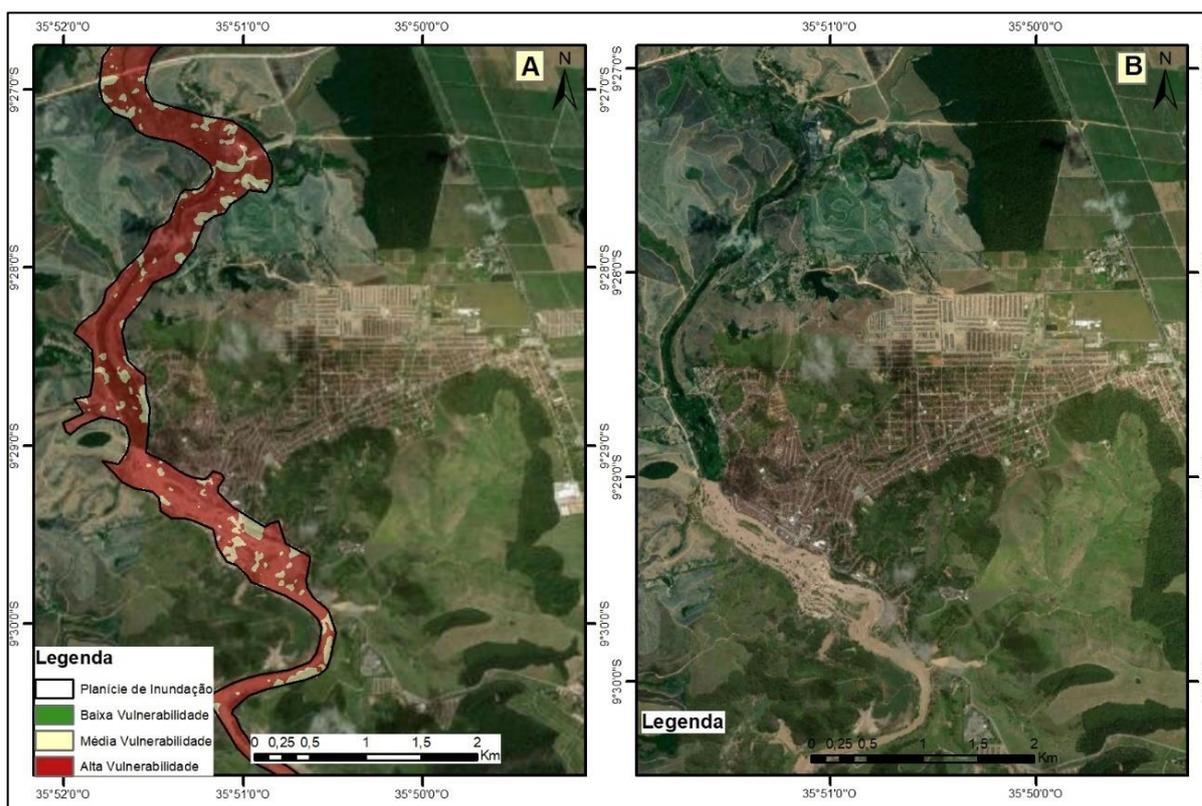


Fonte: (A) o autor (2021), (B) CPRM (2014).

### e) Rio Largo

A modelagem apresentada na figura 36 (A) mostra que a ocupação urbana na cidade de Rio Largo localiza-se à margem esquerda do rio Mundaú. A maior parte da área mapeada encontra-se classificada como sendo de alta vulnerabilidade. A CPRM ainda não realizou o mapeamento de vulnerabilidade nesta cidade. Porém, podemos ver que o modelo de inundação através do método AHP, sem a realização do trabalho de campo, trouxe resultados conclusivos, com base na análise de sobreposição entre os mapeamentos que já foram trabalhadas pela CPRM, sobretudo as áreas de alta vulnerabilidade. Sendo assim, há de se considerar que as regiões mapeadas na figura 36 (A) são suscetíveis a sofrerem os efeitos de um possível evento de inundação.

Figura 36: (A) Modelagem inundação de Rio Largo – AHP (2021)



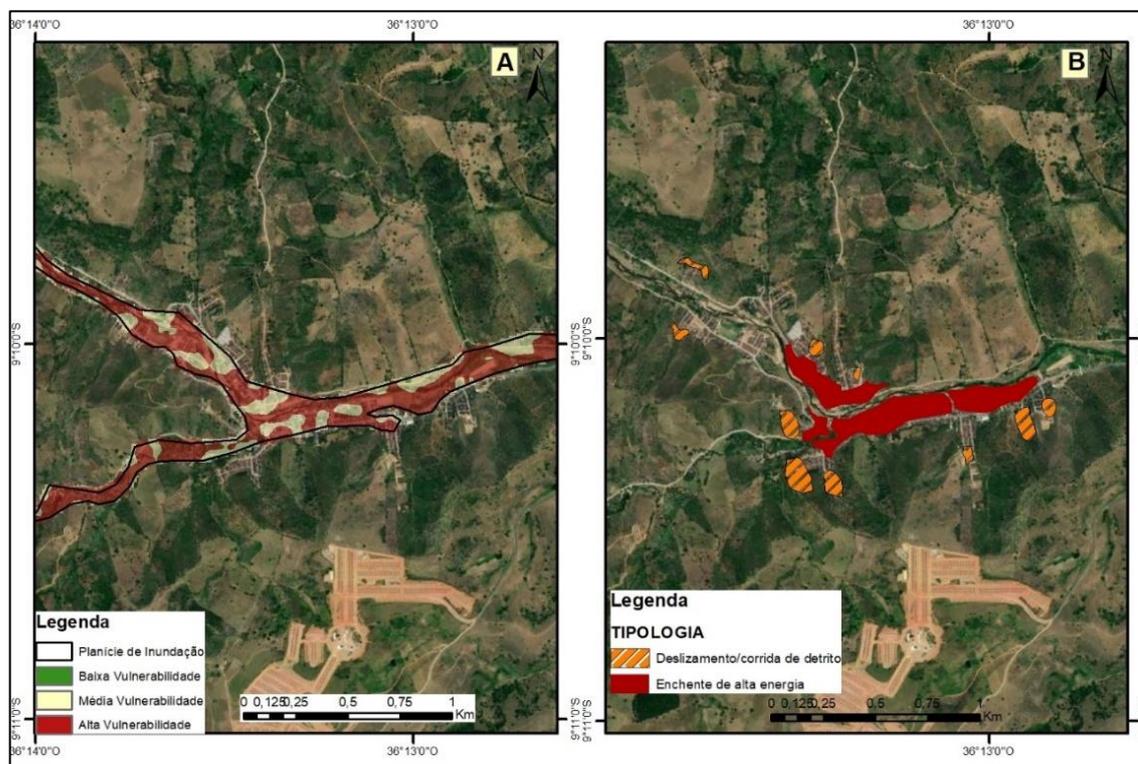
Fonte: o autor (2021)

## f) Santana do Mundaú

A figura 37, que apresenta a modelagem a inundação através do método AHP no quadro (A) e o mapeamento realizado em campo pela CPRM no quadro (B), mostra que o setor urbano está praticamente por completo inserido em área de alta vulnerabilidade   inundação. O quadro (A) apresenta alguns trechos menores, classificados como sendo de média vulnerabilidade, o que pode naturalmente acontecer em decorrência de alguma variação de altitude local ou mesmo de declividade.

Por se localizar em uma região de relevo movimentado, com entornos de alta declividade, conseqüentemente as águas provenientes de chuvas ganham energia ao descer pelas vertentes em direção de áreas mais baixas e planas. Nesse local, de acordo com o IBGE (2010), viviam cerca de 10.961 pessoas.

Figura 37: (A) Modelagem inundação de Santana do Mundaú - AHP. (B) Modelagem a Inundação de Santana do Mundaú – CPRM



Fonte: (A) o autor (2021), (B) CPRM (2012).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta metodológica utilizada neste trabalho para delimitação de áreas de vulnerabilidade à inundação se mostra bastante pertinente no cenário da região hidrográfica do rio Mundaú em Alagoas, tendo em vista a ocorrência de fenômenos de inundações.

A aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP), com a inclusão da variável declividade, demonstrou uma contribuição considerável no modelo quanto ao mapeamento de vulnerabilidade à inundação. Afinal, o resultado da modelagem foi bastante assertivo em qualificar, com mais eficiência, as regiões de alto curso de drenagem quanto a sua alta suscetibilidade inundação. Notadamente, nas regiões mais baixas, as áreas de alta e média suscetibilidade foram espacialmente melhor homogeneizadas.

A modelagem se mostrou eficaz para o mapeamento, mesmo em áreas extensas como a região hidrográfica do Mundaú. Portanto, é importante salientar a sua contribuição, visto que não foram empregados dados de alta resolução, mas ainda assim foi possível chegar em um resultado satisfatório que pode ser empregado em outras regiões a fim de mitigar danos provenientes de altos índices pluviométricos, sobretudo em áreas de ocupação urbana e em áreas de várzeas.

Com a espacialização da mancha de inundação, é possível notar que os locais inundados são respectivamente aqueles que geomorfologicamente estão suscetíveis ao transbordamento das águas dos rios, principalmente a planície de inundação, onde há ocupação pela população ribeirinha

O fato da bacia do rio Mundaú estar inserida nas rochas do embasamento cristalino faz com que os solos dessa região sejam menos desenvolvidos e, com isso, absorvam pouca água. A região apresenta, ainda, uma topografia íngreme, que faz com que a água precipitada ganhe mais velocidade e energia. Isso leva ao escoamento superficial rápido, que, no período de intensas precipitações, como foi o caso de 2010, gera para a calha do Mundaú e seus afluentes um volume imenso de sedimentos e vegetação.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, Shayelli Laiany Mareco. **Análise do risco de desastres por Inundação utilizando o modelo *Height Above The Nearest Drainage (Hand)* na cidade de São João do Rio do Peixe**. 60 f. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

ANA. **Atlas de Vulnerabilidade a Inundações** (2014). Disponível em: [https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/2cfa808b-b370-43ef-8107-5c3bfd7acf9c/attachments/Atlas\\_de\\_Vulnerabilidade\\_a\\_Inundaes.pdf](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/2cfa808b-b370-43ef-8107-5c3bfd7acf9c/attachments/Atlas_de_Vulnerabilidade_a_Inundaes.pdf). Acesso em 09 de setembro de 2021.

ANA. **Planejamento, manejo e gestão de bacias**. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/85?mode=full>. Acesso em 10 de setembro de 2021.

AVADAN. **Relatório de Avaliação de Perdas e Danos: Inundações bruscas em alagoas**. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Inundaes-Bruscas-em-Alagoas.pdf>. Acesso em 10 de setembro de 2021.

BITAR O. Y. (Coord.). (2014). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações-1:25.000: **Nota Técnica Explicativa**. São Paulo: IPT; Brasília, DF: CPRM (Publicação IPT 3016), 2014.

BORJA PIMENTA, L.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. DA S.; AMADOR TAVARES, P. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações (Campo Grande)**, v. 20, n. 2, p. 407-420, 5 jul. 2019.

BRASIL. Código Civil. **Lei nº 12.651**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em setembro de 2021.

BRASIL. Código Civil. **Lei n. 12.608**. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm). Acesso em setembro de 2021.

BARBOSA, Cleonilson Mafra; ESTEVAM, Madson Bruno Soares. Concepções de moradores das comunidades ribeirinhas de Nova Cruz/RN sobre as problemáticas ambientais em torno do Rio Curimataú. In: **IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN**. 2013.

CARAMORI, V; POMPEO, C. **Curso de Aperfeiçoamento em Gestão dos Recursos Hídricos**, 2009.

CARNEIRO, F. Alagoas. In: XAVIER, Yanko Marcius de Alencar; BEZERRA, Nizomar Falcão. (Org.) **Gestão legal dos recursos hídricos dos Estados do Nordeste do Brasil**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer. pp. 17-34, 2005.

CARVALHO, G. **Potencialidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio mundaú**. SEMARH-AL, Maceió, 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda e EDUSP, 1974.

COLLINS, M. G.; STEINER, F. R.; RUSHMAN, M. J. Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements. **Environmental Management**, v. 28, n. 5, pp. 611-21, 2001.

CONCEIÇÃO, A. R. C.; SIMÕES, P. M. L.; DANTAS, M. E. (2019b) Using relief patterns and quartile deviation form modeling of flood susceptibility maps: examples from Presidente Kennedy and Conceição do Castelo, Espírito Santo, Brazil. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, v.2, p.75-86.

CPRM. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa**. Brasília. 2012.

CPRM. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa**. Brasília. 2013.

CPRM. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de União dos Palmares – AL**. Brasília. 2014.

CPRM. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Branquinha – AL**. Brasília. 2014.

CPRM. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Murici – AL**. Brasília. 2014.

EMBRAPA. **Zoneamento agroecológico do estado de Alagoas**: Cartas de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Alagoas na escala 1:100.000. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/2641>. Acesso em 10 de setembro de 2021.

FRAGOSO JUNIOR, C. R.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. B. **Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do Rio Mundaú e Paraíba**. Disponível em: <<https://ctec.ufal.br/professor/vap/Cheia2010.pdf>>. Acesso em setembro de 2021.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, 22 jan. 2017.

GOMES, D. D. M.; LIMA, D. R. M.; VERÍSSIMO, C. U. V.; Duarte, C. R. Mapeamento e caracterização dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú - PE/AL. **Caderno de Geografia**, 26, (2), 272-299, 2016.

Governo do Estado de Alagoas. Governo do Estado de Pernambuco. **Proposta de instituição do comitê das bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio**. Set., 2010.

Governo do Estado de Pernambuco; Secretaria de Recursos Hídricos – SRH; Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Mundaú**. Tomo II – Plano diretor. COTEC – Consultoria Técnica Ltda. Jan, 1999.

HAND Model. Disponível em: [http://handmodel.ccst.inpe.br/?page\\_id=161&lang=en](http://handmodel.ccst.inpe.br/?page_id=161&lang=en). Acesso em 10 de setembro de 2021.

IBGE. **Estimativas Populacionais**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em 08 de setembro de 2021.

IELO, E. M., **Estudo de vulnerabilidade a inundações no Município de Ourinhos (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2015.

IPT, 2007, BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. CARVALHO, Celso S., MACEDO, Eduardo. S. de, OGURA, Agostinho T. (Orgs.). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007. 176 p. Disponível

em:<[http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoEradicacao/Livro\\_Mapeamento\\_Enconstas\\_Margens.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoEradicacao/Livro_Mapeamento_Enconstas_Margens.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2016.

LIMA, W. P., LCF 678 – O Ciclo hidrológico e balanço hídrico. In: **Manejo de Bacias Hidrográficas**. São Paulo: ESALQ. pp. 50 – 69, 1996.

MANTOVANI, J. R.; BACANI, V. M. Uma proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis a inundação e/ ou alagamento na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS. **Geusp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 22, n. 3, p. 687-706, dez. 2018.

MARCUZZO, F.; ROMERO, V.; CARDOSO, M. R. D. Detalhamento Hidromorfológico da Bacia do Rio Mundaú. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. [**Anais...**] Maceió: ABRH, 2011.

MESSIAS, C. Estudo geomorfológico de bacias hidrográficas do reservatório do funil, alto rio grande (MG), por meio de imagens estereoscópicas ALOS/PRISM (2014) In: **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume 28, pp. 237-262, 2014.

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; CUARTAS, L. A. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 200–208, 2016.

MONTEIRO, K. A.; CORRÊA, A. C. B., Análise dos perfis longitudinais dos rios Sinhaem, Una e Mundaú (PE/AL) a partir de aplicação do Índice de Hack. In: **Revista Contexto Geográfico**, Maceió, v. 1, n. 1, p. 85-93, jul. 2016.

NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.G.; RENNÓ, C.D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. *Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model*. **Jornal of Hydrology**, v. 404, p.13-29, 2011.

OCHA. **NATURAL DISASTERS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN** (2020). Disponível em: <[https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/20191203-ocha-desastres\\_naturales.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/20191203-ocha-desastres_naturales.pdf)>. Acesso em 09 de setembro de 2021.

RENNÓ C.D., NOBRE A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTMDEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. In: **Remote Sensing of Environment**, v.112, pp. 3469 - 3481, 2008.

ROLIM, G.S.; CAMARGO, M.B.P; LANIA, D.G.; MORAES, J.F.L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. In: **Bragantia**, v.66, p.711-720, 2007.

ROSS, J. L. S. - O registro cartográfico dos fatos Geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP**, n.º 6, 17-29, 1992.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, jan. 2008.

SOUZA, J. C. Análise do Evento Climático Extremo Ocorrido na Região Leste de Alagoas: Bacias Hidrográficas dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 2, p. 377-395, 2011.

TRENTIN, R. *et al.* Mapeamento das Unidades de Relevo, com Base em Parâmetros Morfométricos, no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Itu, RS. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 5., 2004, Santa Maria. **Anais [...]**. Santa Maria: Ufsm, 2004. p. 1-13.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação 2.** ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. In: **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 /** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

UOL. **Estrutura de uma bacia hidrográfica.** Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/bacia-hidrografica.htm>>. Acesso em 08 de Junho de 2021.

VARGAS, H. **Ocupação irregular de APP urbana:** um estudo da percepção social acerca do conflito de interesses que se estabelece na Lagoa do Prato Raso, em Feira de Santana, BA. 2008. 211 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

WALTER, B. M., MILAN, P. **Cenário de tsunami no Nordeste.** 21 de jun. 2010. II. color. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/cenario-de-tsunami-no-nordeste-1dvohyhgmb1fj91c0l0kgxu6/>. Acesso em: 29 junho 2021.