



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS

RAFAEL CASTELO BRANCO ENGELHARDT

**SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÃO EM BOA VISTA – RR, USO DOS MODELOS DE
ELEVAÇÃO ALOS PALSAR, MERIT E SOFTWARE HEC-RAS**

Boa Vista, RR

2024

RAFAEL CASTELO BRANCO ENGELHARDT

**SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÃO EM BOA VISTA – RR, USO DOS MODELOS DE
ELEVÇÃO ALOS PALSAR E MERIT E DO SOFTWARE HEC-RAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Roraima, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídrico

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

Boa Vista, RR

2024

RAFAEL CASTELO BRANCO ENGELHARDT

**SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÃO EM BOA VISTA – RR, USO DOS MODELOS DE
ELEVÇÃO ALOS PALSAR E MERIT E DO SOFTWARE HEC-RAS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado Profissional em Rede Nacional em
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
da Universidade Federal de Roraima, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos. Área de concentração:
Regulação e Governança de Recursos
Hídrico

Prof. Dr. Adriano da Silva Frutuoso
Orientador/ProfÁgua – UFRR

Prof. Dr. Alex Bortolon de Matos
Examinador Interno/ProfÁgua – UFRR

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Examinador Externo/DEHA – UFC

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Criador do universo, que por sua soberania e graça me concedeu a oportunidade de fazer o mestrado PROFÁGUA na UFRR, e que nos sustenta nos desafios da vida, concedendo de acordo com a Sua vontade, energia e disposição para estar realizando nossas atividades diárias.

A minha esposa, Kássia, que pacientemente e com toda a dedicação cuida de nossa família, e foi fundamental para que eu pudesse me dedicar ao mestrado.

A meus pais, Denis e Rebeca, pela educação que me foi dada e pelo carinho e atenção que nos deram nos momentos que precisamos.

RESUMO

A zona urbana de Boa Vista – RR ocupa uma área de relevo plano com formação de lagoas naturais. Essa característica do terreno contribui para a ocorrência de inundações durante o período chuvoso. Essas inundações causam prejuízos diversos à população, e por sua recorrência torna-se importante o conhecimento prévio que a realização de simulações de inundação traz, expondo riscos e auxiliando na prevenção e planejamento. Para que sejam realizadas simulações de eventos de inundação dos igarapés, são indispensáveis os modelos de elevação, como Alos Palsar e SRTM, porém a condição de relevo no entorno de Boa Vista, com pouca variação altimétrica e presença de ilhas de floresta às margens dos principais igarapés resultaram em modelos com elevada presença de erros, dificultando a aplicação da metodologia que se utiliza desses modelos, isso foi observado quando comparadas as simulações com a observação visual dos eventos, e evidenciado na pesquisa. Para solução do problema foi verificada metodologia de simulações para análise de área de inundação com HEC-RAS utilizando o modelo de elevação MERIT no bairro Olímpico, zona oeste da cidade. Pôde-se verificar então com a referida metodologia a abrangência da inundação resultante para o período de retorno de 5, 10 e 20 anos.

Palavras-chave: Simulação de inundação, HEC-RAS, Modelo de Elevação Alos Palsar e MERIT.

ABSTRACT

The Boa Vista, Roraima Urban zone are located at the area of flat terrain with natural lagoon formation, that condition contribute for the flood occurrence in the raining season. These floods cause numerous incidents and losses to the population that occupies these areas, making it very important to carry out flood simulations that can inform people of the risks and assist in prevention and planning. To carry out simulations of flood in stream with the HEC-RAS Software, the relief condition with little altimetric variation in addition to the presence of forest islands on the banks of the main streams, result in models with a high presence of errors, making it difficult to apply a methodology that includes these elevation models. This was observed when comparing the simulations with the visual observation of the events and the research. With means to resolve this problem, was verified the methodology toward the simulation in HEC-RAS and MERIT Digital Elevation Model of the flood in a stream of the Olimpico district, west zone of the city. Then was possible to verify with the mentioned methodology the resulting flood coverage for the return period of 5, 10 e 20 years.

Keywords: Stream simulation, HEC-RAS, MERIT and Alos Palsar Digital Elevation Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Detalhes da bacia hidrográfica.....	7
Figura 2: Relação entre forma da bacia e gráfico de escoamento.....	8
Figura 3: Mancha de inundação no vale do córrego Ahr, cidade de Dernau.....	10
Figura 4: Inundação no vale do córrego Ahr, cidade de Dernau.....	11
Figura 5: Imagem de Satélite do município de Boa Vista.....	13
Figura 6 – Janelas do software HEC-RAS.....	16
Figura 7: Inundação em 2011 simulada no HEC-RAS, córrego do Corvo Branco – SP.....	17
Figura 8: Fluxograma de metodologia da pesquisa.....	18
Figura 9: Mapa de Manejo de Águas Pluviais do Estado de Roraima.....	20
Figura 10: Imagem de Satélite com demarcação das zonas Oeste e Sul em Boa Vista.....	21
Figura 11: Em vermelho e laranja, áreas de risco e o nome dos igarapés em Boa Vista.....	22
Figura 12: Janela mostrando resultado da simulação.....	23
Figura 13: Ocupação de área de lagoa e vala.....	23
Figura 14: Mapa com as bacias dos igarapés Urbanos de Boa Vista – RR.....	24
Figura 15: Hidrograma Unitário, parâmetros estudados.....	26
Figura 16: Visualização dos efeitos da inundação no terreno.....	30
Figura 17: Mapa com fotos de situações de inundação.....	31
Figura 18: Delimitação da bacia sobre a imagem de satélite de Boa Vista.....	32
Figura 19: Hietograma e Hidrograma para a chuva do dia 25/04/2023.....	34
Figura 20: Comparação de imagens do SRTM (original) e MERIT.....	35
Figura 21: Ondulações no curso do igarapé.....	36
Figura 22: MDE com trecho do Igarapé Grande.....	37
Figura 23: Mancha de inundação para Período de Retorno de 5 anos.....	38
Figura 24: Mancha de inundação para o Período de Retorno de 10 anos.....	39
Figura 25: Mancha de inundação para chuva com Período de Retorno de 20 anos.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de Manning.....	31
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

i_m = intensidade de precipitação pluviométrica média das máximas, (mm/h).....	25
T = período de retorno.....	25
t = duração da precipitação pluviométrica, em minuto.....	25
t_d = duração da precipitação.....	26
t_p = diferença entre os tempos de pico do hidrograma e do ietograma.....	26
q_p = vazão de pico.....	26
t_a = tempo de ascensão do HU.....	26
t_r = tempo de recessão do HU.....	26
t_b = tempo de base do HU.....	26
A = Área da bacia, (km ²).....	36
L = Comprimento axial da bacia, (km).....	36
Fc = Índice de Conformação.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	JUSTIFICATIVA.....	7
3	OBJETIVOS.....	8
3.1	OBJETIVO GERAL.....	8
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4	REFERENCIAL TEÓRICO	6
4.1	ESTUDO DA INUNDAÇÃO EM ÁREA URBANA.....	6
4.2	MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMA DE ALERTA E MONITORAMENTO DE INUNDAÇÕES.....	9
4.3	ÁREAS DE INUNDAÇÃO NA CIDADE DE BOA VISTA	12
4.4	A TECNOLOGIA SIG E O SOFTWARE HEC-RAS	15
5	MATERIAIS E MÉTODOS	19
5.1	ÁREA DE ESTUDO	19
5.1.1	Curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF).....	25
5.1.2	Relevo.....	26
5.1.3	Estudo da Bacia hidrográfica.....	27
5.1.4	Coeficiente de Manning.....	28
5.2	SIMULAÇÃO E CONFECÇÃO DOS MAPAS	29
5.3	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS	30
5.3.1	Igarapé Grande	30
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Em qualquer forma de aglomerado humano, cidades, vilas ou povoados pequenos, as características relacionadas à hidrologia e à morfologia do terreno são determinantes para o nível de risco ao qual estarão sujeitos os habitantes. Esse risco existente por natureza tende a aumentar com as alterações desses espaços pelo processo de urbanização, em alguns casos gerando desastres naturais. No Brasil, segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA a maior parte dos desastres naturais tem relação com fatores climáticos (BRASIL, 2023).

Considerando esses aspectos e analisando o grupo de risco hidrológico, subgrupo inundações, a compreensão da forma de escoamento causado pela precipitação e a interação dessa com o relevo é de fundamental importância no estudo de soluções que resultem em diminuição dos efeitos desse tipo de desastre, pois possibilita que sejam tomadas medidas de precaução em eventuais mobilizações como evacuações de emergência, considerando que uma vez ocupado o espaço as pessoas dificilmente irão se mudar para outros locais, mesmo conhecendo os riscos.

A região norte do país por sua história de ocupação recente é a que concentra menos estudos em diversos aspectos. As áreas críticas de drenagem de Boa Vista – RR, por exemplo, que são áreas susceptíveis a inundações ou alagamentos, são conhecidas na maioria das vezes apenas de forma empírica, e soluções de engenharia são dadas sem o conhecimento geral da macrodrenagem envolvida, além da falta do instrumento Plano Diretor de Drenagem Urbana.

Atualmente de acordo com estimativas do IBGE que atribuem o forte crescimento populacional em Roraima à imigração em massa de estrangeiros (BRASIL, 2021), o município de Boa Vista vem sofrendo com carência de moradias o que estimula as invasões a propriedades e a áreas de preservação. Apesar do poder público ter ordenado expansão do ponto de vista ambiental, através de instrumentos legais e atuação da secretaria de urbanismo em algumas frentes de expansão urbanas, principalmente alterando o modelo grade principal da cidade para outras configurações mais adequadas ao relevo e aos corpos d'água, ocupações espontâneas surgem com mais frequência em locais impróprios como nas ilhas de floresta que margeiam os rios, igarapés e lagoas da região de savana de Roraima.

A zona oeste do município é onde se concentram a maior parte dessas ocupações, com o crescimento da cidade, muitas áreas de nascentes que são abundantes e formam lagos, foram aterradas e ocupadas e hoje fazem parte do ambiente urbano com poucas características do terreno natural principalmente na parte mais central da zona, comportamento semelhante é

considerado ilegal nas áreas de expansão atuais, pois os loteamentos novos devem seguir a Lei Municipal Nº 925 de 28 de novembro de 2006, que dentre outros aspectos, impede que sejam ocupadas as áreas alagadiças e de preservação (BOA VISTA, 2006).

Quando ocorrem, as ocupações irregulares não observam aspectos da lei, e sendo áreas atrativas para moradia pela localização privilegiada, mais próxima de locais de trabalho e comércio, a população tende a resolver os problemas ocasionados nessas áreas que compõem os leitos dos igarapés (rios de primeira e segunda ordem) de forma imediata com aterro, ocupando o espaço que serviria naturalmente para o escoamento excedente nos períodos mais chuvosos, expondo essas pessoas a riscos relacionados aos efeitos das enchentes, principalmente com perdas materiais.

2 JUSTIFICATIVA

Observando o relevo da parte urbana do Município de Boa Vista percebe-se que o relevo possui características que tornam a cidade propensa à inundações. São dois fatores principais de vulnerabilidade: o primeiro é a baixa altimetria de Boa Vista que torna a vazão do sistema lenta ao viabilizar em seu formato natural (antes da ocupação humana) grande concentração de lagoas naturais, essas juntamente com igarapés que em geral possuem leitos maiores extensos e derivam desses lagos, formam um complexo sistema entrelaçado, paisagem marcante da área de savana roraimense ao qual a área urbana do município está integrada (ARAÚJO, 2016), o segundo refere-se ao desenvolvimento da cidade na margem dos rios Branco e Cauamé, corpos d'água com vazões consideráveis e que em certos períodos chuvosos extrapolam suas calhas para planícies de inundação. Dessa forma tanto a baixa altimetria quanto a proximidade dos rios Branco e Cauamé, além do crescimento planejado da cidade no modelo de grade, sem respeitar o relevo existente (lagos sazonais e planícies de inundação) são fatores que corroboram para ocorrência de inundações urbanas.

Compreendendo a importância da dinâmica desses eventos, a proposta é a utilização de software capaz de simular o comportamento de um corpo d'água durante eventos de chuvas críticas para mapear área de influência de inundação de igarapé urbano em estado considerado crítico por conter áreas de risco hidrológico segundo o Serviço Geológico do Brasil, criando as chamadas “manchas de inundação”, projeção da área de inundação sobre o mapa da cidade. São áreas que sofrem alagamentos em diferentes níveis dependendo da intensidade das chuvas, o comportamento natural de acumulação de água é, portanto, visualizado através de um modelo computacional capaz de simular o relevo, terreno e os eventos climáticos.

Contribuindo nesse aspecto e observando as publicações locais de conteúdo acadêmico, percebe-se que essa questão se encontra pouco aprofundada, com publicações que apesar de interessantes, não tem a intenção de delimitar as áreas de risco utilizando técnica semelhante à proposição desse trabalho. Os resultados irão contribuir para uma reflexão e análise crítica das áreas levantadas e subsidiam possível sistema de alerta de cheias, muito útil para evitar perdas materiais e humanas.

3 OBJETIVOS

Contribuindo para a produção de conteúdo relacionado ao tema inundação em área urbana, são alvos dessa pesquisa os seguintes objetivos.

3.1 OBJETIVO GERAL

Estudar através do Software HEC-RAS e os modelos de elevação Alos Palsar e MERIT, os limites das áreas inundáveis e cheias em igarapés da área urbana do município de Boa Vista – RR que se encontram em estado crítico por representarem riscos a ocupações humanas existentes.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir um banco de dados com informações de relevo utilizando modelos de elevação, MDE, gratuitos e de vazões do igarapé através da IDF de Boa Vista e da produção de Hidrogramas Unitários (HU) com o software HEC-HMS.
- Simular com os modelos de elevação Alos Palsar e MERIT os cenários de ocorrência de inundação no Software HEC-RAS.
- Delimitar as áreas propícias a inundação considerando o alcance da linha de água gerada pelo software.
- Criar Mapa de “Manchas de Inundação”, mapeamento das áreas de inundação de igarapé em área de risco de inundação.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o desenvolvimento das cidades ocorrem alterações bruscas no relevo natural que precisam ser estudadas para que danos causados por diversos eventos como as inundações, não surpreendam por serem desencadeados sem avisos e tragam prejuízos e destruição. Esses acontecimentos decorrem muitas vezes de falta de conhecimento científico e ausência de técnica adequadas para minimizar os efeitos sobre a infraestrutura urbana. Além disso o conhecimento empírico sobre determinada região, muitas vezes utilizado como base para a organização, não consegue explicar tais condições extremas, não condiciona o preparo da infraestrutura nem dos sistemas de alerta que poderiam evitar muitas perdas de vidas e prejuízos financeiros (HERZOG, 2013).

O conhecimento adquirido pela humanidade ao longo dos anos tornou possível, dentre outros feitos, a capacidade de correção da infraestrutura com base na predição de eventos catastróficos. São estudos realizados sobre diversos aspectos que minimizam os efeitos e as vítimas e são de grande importância para a segurança de todos.

4.1 ESTUDO DA INUNDAÇÃO EM ÁREA URBANA

A inundação em área urbana ocorre devido a um processo de transformação de uma área, que em seu formato natural, sem a intervenção humana, apresenta características que a torna pertencente a uma bacia hidrográfica, ou seja, um ambiente em que existe uma dinâmica de fluxo de água que interfere no meio ambiente.

Uma bacia hidrográfica é uma área geográfica definida pela delimitação das terras que contribuem para um único sistema de drenagem, composto por rios, riachos e outros corpos d'água que convergem para um ponto comum, geralmente um rio principal ou lago. Essa área é caracterizada pela etapa do ciclo hidrológico, que envolve a captação, armazenamento, transporte e liberação da água.

A principal unidade funcional de uma bacia hidrográfica é a rede de drenagem, que consiste nos cursos d'água interconectados que coletam e transportam água de áreas mais altas para áreas mais baixas. A água da chuva, neve derretida e outros tipos de precipitação coletam-se em riachos e rios menores, eventualmente fluindo para rios principais e, por fim, para o oceano, um lago ou outro corpo d'água terminal.

A delimitação de uma bacia hidrográfica é geralmente realizada com base nas divisões naturais das montanhas, colinas e outros relevos do terreno, formando limites que direcionam

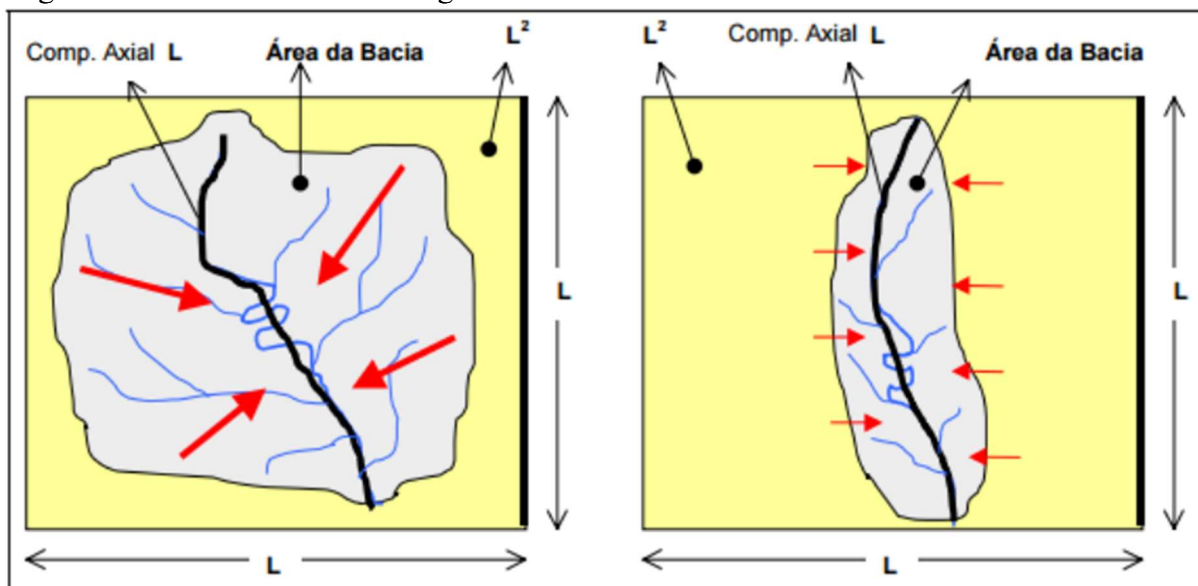
o fluxo da água. O estudo das bacias hidrográficas é essencial para entender a dinâmica da água, a gestão dos recursos hídricos, a prevenção de inundações e a conservação ambiental.

Além disso, bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico, na sustentação da vida aquática e no fornecimento de água potável para comunidades humanas. A gestão sustentável dessas áreas é vital para garantir a preservação dos recursos hídricos e a qualidade ambiental, por isso é de grande importância o seu estudo dentre outros fatores, para compreender a resposta da bacia a eventos como precipitação, escoamento e mudanças ambientais.

Para caracterização de uma bacia, são utilizados parâmetros morfológicos, esses parâmetros referem-se às características físicas e geomorfológicas da área de drenagem. Eles são fundamentais para compreender a forma e a estrutura da bacia, influenciando o comportamento hidrológico e a dinâmica dos recursos hídricos (VILELLA, S. M.; MATTOS, 1975). Alguns dos parâmetros morfológicos mais relevantes de uma bacia hidrográfica são:

Área da Bacia (A): Refere-se à extensão total da superfície da bacia hidrográfica. É medida em quilômetros quadrados (km²) ou hectares (ha), Figura 1.

Figura 1: Detalhes da bacia hidrográfica.



Fonte: Caracterização de Bacias Hidrográficas, (Bargos, 2019).

Perímetro da Bacia (P): É o comprimento total da linha que delimita a bacia. A unidade de medida é geralmente em quilômetros (km).

Comprimento do Curso D'água Principal (L): Representa a distância ao longo do rio principal, desde a nascente até a foz. É uma medida importante para avaliar o comprimento total do sistema fluvial.

Declividade Média (S): Indica a inclinação média do terreno ao longo do curso d'água principal. Geralmente expressa em metros por quilômetro (m/km) ou em porcentagem (%).

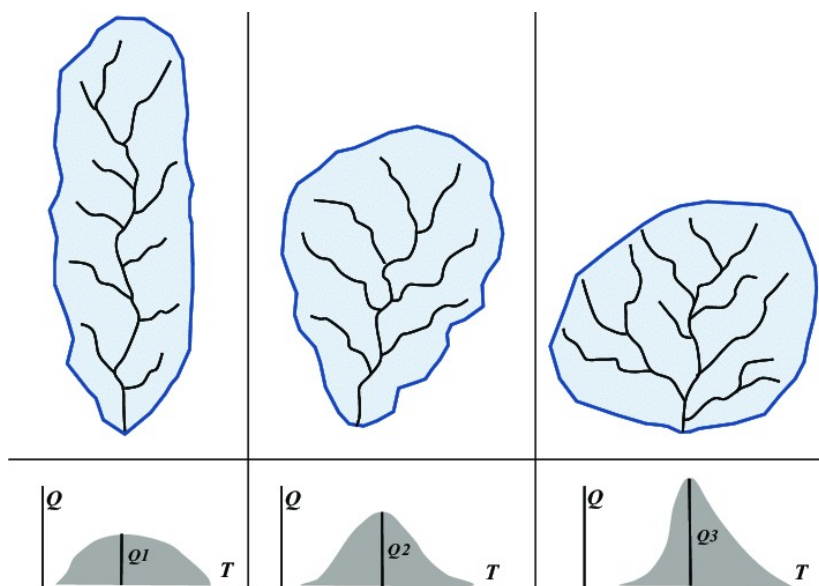
Índice de Sinuosidade (IS): Mede a irregularidade do curso d'água principal e é calculado como a razão entre a distância real percorrida pelo rio e a distância em linha reta entre a nascente e a foz.

Densidade de Drenagem (Dd): Refere-se à quantidade de rios e riachos na bacia em relação à sua área total. Calcula-se dividindo o comprimento total dos cursos d'água pela área da bacia.

Altitude Máxima e Mínima: Representa a elevação mais alta e mais baixa dentro da bacia. Esses valores são importantes para entender a variação topográfica.

Forma da Bacia: A forma da bacia pode ser avaliada usando índices como o Fator de Forma (relação entre a largura média e o comprimento da bacia) e o Índice de Compacidade (relação entre a área e o quadrado do comprimento), Figura 2.

Figura 2: Relação entre forma da bacia e gráfico de escoamento.



Fonte: Modificado de Patton (1988), Goerl, R. F. et al (2012).

De muita relevância para análise de risco, o fator de forma conforme demonstrado na Figura 2, relaciona o formato da bacia, à forma do escoamento dentro da bacia, quanto mais

próxima a forma for de um quadrado, mais tendência a picos de cheias mais intensos, e quanto mais alongada, menor a intensidade do pico de cheias.

4.2 MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMA DE ALERTA E MONITORAMENTO DE INUNDAÇÕES

Desastres naturais ocasionados por inundações são eventos que ocorrem com grande frequência dependendo da região. Ser capaz de detectar fenômenos que possam desencadear precipitações potenciais e relevos sujeitos a essas ocorrências, aliados a um sistema de alerta de perigo iminente, auxiliam no preparo para a situação que pode ser desencadeada, e podem evitar perdas tanto financeiras quanto de vidas. De acordo com Tucci, (2012) existem duas abordagens em drenagem urbana, as não estruturais (leis, alertas de inundação e outros) e as estruturais (obras de engenharia). Essas duas formas de analisar e resolver problemas apesar de distintas, são complementares.

Observando o aspecto de sistemas de alerta no Brasil, observa-se que o Governo Federal através do site do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), disponibiliza mapas com áreas de riscos diversos, como o Mapa para Prevenção de Desastres, (BRASILa, 2022). e o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE), (BRASILb, 2022).

O Mapa para Prevenção de Desastres é uma ferramenta de análise de condições que facilitam a ocorrência de eventos de risco (BRASILa, 2022), que podem ser desencadeados inclusive por fenômenos hidrológicos, como por exemplo uma área que seja propensa a inundação, no mapa são delimitadas áreas com diferentes cores indicando o risco de ocorrências de desastres e a vulnerabilidade da população. Esse mapa tem abrangência nacional, e em Boa Vista áreas de risco de inundação estão delimitadas.

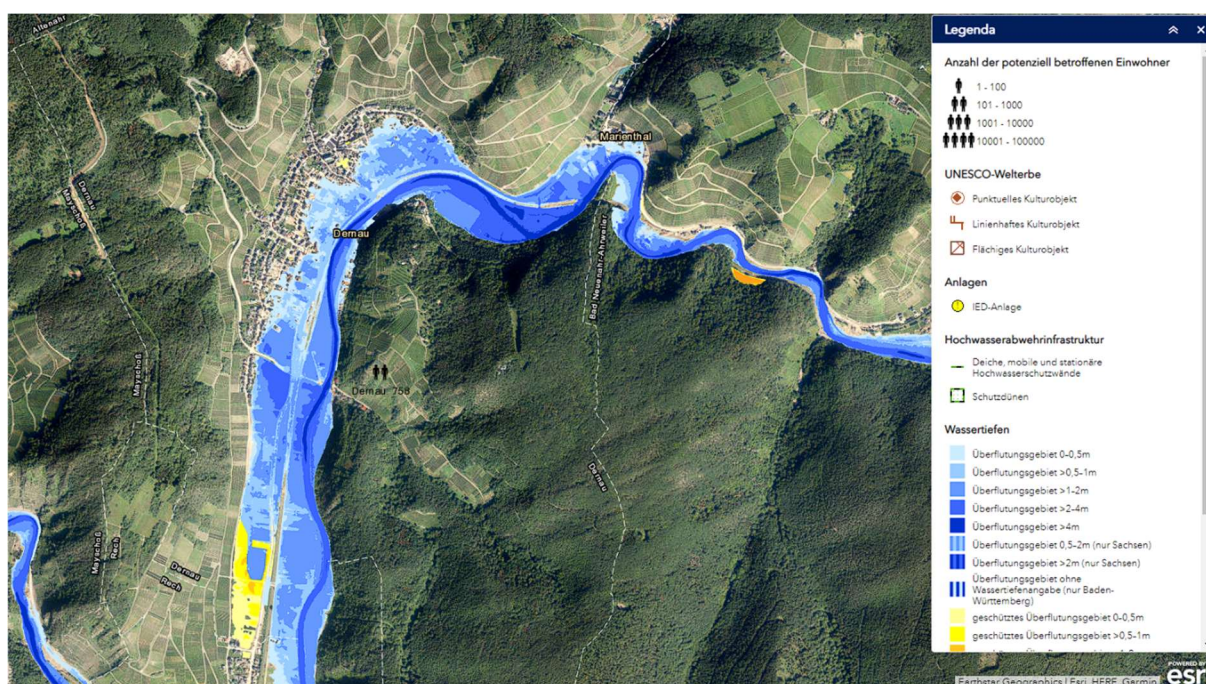
O Sistema de Alerta de Eventos Críticos utiliza dados de estações fluviométricas e pluviométricas com resposta de dados obtidos de 1h, essas estações estão instaladas próximas aos municípios mais suscetíveis para monitoramento da situação atual e emissão de alertas. O estado da estação pode ser classificada como normal, ou então em alerta de três tipos: Cota de Alerta, Cota de Inundação e Cota de Inundação Severa, o sistema contempla algumas bacias importantes do Brasil, inclusive a bacia do Rio Branco, com estações de monitoramento em Boa Vista, Caracará, Mucajaí e Bonfim, além de estações intermediárias localizadas a montante de Boa Vista, que podem emitir alertas preventivos em caso de eventos que possam afetar essas cidades (BRASILb, 2022).

No Brasil existem outros sistemas de alerta inclusive mantidos pelos próprios estados, como o Sistema de Alerta de Inundações de São Paulo (SAISP), que faz o monitoramento das bacias do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2022). O sistema de alerta do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), fornece alertas de risco meteorológico, geológico e hidrológico a nível nacional (BRASILc, 2022).

Existe um movimento para unificação dos sistemas que foi estabelecido pela conferência de Sendai para o período de 2015 a 2030, e supervisionada pelo escritório das Nações Unidas para Redução dos Riscos de Desastres – UNDRR (ONU, 2015). A unificação dos sistemas é muito importante para que a população receba as informações de risco referentes aos possíveis desastres.

Uma forma de analisar situações ideais para um sistema de monitoramento de riscos é verificar como são as ferramentas em outros países, a Figura 3 apresenta a mancha de inundação calculada para o córrego Ahr na Alemanha, que em 2021 durante a ocorrência de fortes chuvas, gerou-se inúmeros casos de inundações.

Figura 3: Mancha de inundação no vale do córrego Ahr, cidade de Dernau.



Fonte: Länderübergreifendes Hochwasser Portal (LHP), 2022.

Na Figura 3 é possível observar o mapeamento das áreas sujeitas a alagamentos. No site do sistema utilizado na Alemanha, Länderübergreifendes Hochwasser Portal (LHP), é disponibilizado mapa com as manchas de inundação (Hochwassergefahrenkarte) para todo o

país em página da internet, no sistema podem ser observadas as manchas de inundação da rede hidrográfica segundo as possibilidades de alagamentos com cotas que variam entre 0–0,5m, 0,5–1m, 1–2m, 2–4m e maior que 4m. Dessa forma os riscos ficam delimitados e podem ser acessados facilmente pela população, assim, além de alertas existe o mapa de inundação capaz de demonstrar a sua magnitude e o alcance da água de acordo com as cotas de inundação (LHP, 2022), na Figura 4 é percebida visualmente a previsão de inundação ocorrendo durante o evento de inundação de 2021.

Figura 4: Inundação no vale do córrego Ahr, cidade de Dernau.



Fonte: WeinKulturDorf Dernau, 2022.

Conforme pode-se observar na Figura 4, a inundação apesar de ser um evento bastante incomum pela intensidade elevada, estava prevista na mancha de inundação na cidade de Dernau com pontos bem detalhados de ocorrência de inundações de 2m e de mais de 4m.

Em 2024, o Rio Grande do Sul enfrentou uma série de inundações severas, especialmente em abril e maio. A combinação de chuvas intensas e a saturação do solo resultaram em episódios críticos que afetaram várias cidades.

No início do mês de abril, uma frente fria trouxe chuvas torrenciais, especialmente nas regiões da Serra e do Vale dos Sinos. Entre os dias 3 e 5, as precipitações ultrapassaram 200 mm em algumas áreas, causando inundações e deslizamentos de terra. Cidades como Novo Hamburgo e São Leopoldo foram duramente atingidas, com diversas famílias evacuadas.

Em Maio de 2024 o mês começou com um novo sistema de baixa pressão que trouxe mais chuvas a partir do dia 10. Entre 15 e 20 de maio, o volume de água acumulado superou os 300 mm em alguns municípios, intensificando os danos. Porto Alegre também sofreu com alagamentos em diversas regiões, afetando o transporte público e causando interdições em vias importantes.

Os órgãos de defesa civil foram mobilizados, e o governo estadual decretou situação de emergência em várias localidades. A solidariedade da população foi notável, com campanhas de arrecadação de alimentos e roupas para as vítimas.

4.3 ÁREAS DE INUNDAÇÃO NA CIDADE DE BOA VISTA

O Processo de desenvolvimento das áreas urbanas no Brasil foi muito intenso, durante o século XX principalmente durante as décadas de 70 e 80, com diversas correntes migratórias internamente no Brasil, na maior parte das vezes envolvendo a mudança da área rural para a urbana, esse fluxo de pessoas favoreceu a existência de ocupações carentes de vários equipamentos primordiais, principalmente os ligados área de saneamento ambiental, como esgotamento sanitário e drenagem urbana.

Quer seja pela falta de recursos ou de planejamento a maioria das cidades, ainda tem crescido sem um olhar técnico das áreas em expansão, aspectos como: relevo, cobertura vegetal e tipo de solo, além do planejamento urbano prévio muitas vezes são ignorados, resultando em uma ocupação desordenada do espaço o que facilita a ocorrência de eventos indesejados e perigosos para os habitantes (CAMARANO; ABRAMOVAY, 1999).

A história da ocupação do município de Boa Vista, em comparação com outras áreas do Brasil é bastante recente, organizada a partir do Século XIX (BARBOSA, 1993) o seu desenvolvimento e crescimento acelerado se deu principalmente após a metade do século XX, em decorrência da intensa migração principalmente de brasileiros causada pela procura por minerais Barros, (1995) e mais recentemente a partir de 2017 de imigrantes venezuelanos que saíram de seu país devido à escassez provocada pelo colapso do Estado (OLIVEIRA, 2019).

O município de Boa Vista – RR segundo projeção populacional do (BRASIL, 2021) tem crescido atualmente a uma taxa de 5,1% ao ano, sendo local de imigração de brasileiros e atualmente, desde 2017 em maior incidência de estrangeiros que pressionam o mercado imobiliário e as ocupações irregulares, devido a esse crescimento e características peculiares da região, o planejamento urbano na cidade tem enfrentado muitos desafios, pois áreas vulneráveis a transbordamentos e inundações na ocorrência de chuvas intensas são muito presentes devido ao relevo plano, sendo a dinâmica de precipitação, escoamento lento e acumulação em lagoas naturais o regime prevalente na área que foi urbanizada, podemos observar essas características na Figura 5, imagem de satélite mostrando a expansão da área urbana do município, e o terreno natural.

Figura 5: Imagem de Satélite do município de Boa Vista



Fonte: Imagem modificada do Software Google Earth.

Na Figura 5 é possível observar a presença das lagoas naturais e os igarapés interligando essas lagoas na parte ainda não urbanizada à esquerda e o avanço da área urbana sobre esses sistemas à direita. A forma de ocupação acelerada do espaço urbano, favoreceu o surgimento de bairros com pouco planejamento, na Figura 4 é possível observar que os bairros com maior densidade urbana a maior parte das lagoas e igarapés foram suprimidas, isso ocorre

principalmente com ocupações irregulares de áreas de preservação, não sendo respeitados os limites dos corpos d'água existentes, muitas construções foram feitas em locais de risco e o ecossistema existente no entorno também foi suprimido (ARAÚJO, 2016).

Outro aspecto a ser considerado é o adensamento urbano em áreas já ocupadas, o processo se dá pela tendência de ampliações e melhorias nas construções iniciais que levam ao aumento da taxa de ocupação do solo, situação da parte mais central da cidade, que foi ocupada de forma desordenada e com o passar do tempo consolidada como cidade e que se encontra bem mais urbanizada. Esse processo descrito de adensamento e impermeabilização do solo, favorece o aumento do escoamento superficial, elevando a pressão sobre as estruturas existentes para sua máxima capacidade e em casos extremos ao colapso do sistema de drenagem (TUCCI, 2012).

Segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN, 1936), a cidade está localizada no grupo climático Aw Tropical de Savana, com dois períodos bem distintos, um seco e o outro úmido, no período úmido ocorrem algumas precipitações de intensidade elevada, direcionando a atenção da administração pública local a soluções de engenharia para mitigação do problema que é agravado pela pouca declividade, conforme citado, que torna o escoamento superficial mais lento.

De acordo com Tucci (2012), os principais problemas relacionados ao uso do solo que resultam em impactos diretos sobre os recursos hídricos são: a expansão irregular sobre os mananciais comprometendo a sustentabilidade hídrica da cidade, as ocupações de áreas de risco, o aumento da densidade habitacional que causa pressão sobre serviços de saneamento e a impermeabilização das áreas públicas como canalizações pavimentação que direciona o fluxo de água e produzem inundações em vários trechos.

Analisando os estudos de Benini (2019), percebe-se que existe um conhecimento geral por parte da população da problemática relacionada à falta de infraestrutura urbana, vinculado pelos meios de comunicação é comum que seja noticiado, por vezes motivado por denúncias dos próprios moradores, a invasão de áreas de proteção ou de risco, a carência dos serviços públicos, falta de saneamento, poluição e ocorrências relacionadas como deslizamentos, inundações e doenças causadas por esses meios, que causam prejuízos e perdas humanas, porém não são levadas ao conhecimento da população as origens de tais problemas, que são relacionadas ao intenso processo de adensamento urbano e carência de instrumentos de controle e ordenamento do solo eficientes, esses muitas vezes são obsoletos e sem continuidade nos projetos devido a objetivos e interesses de diferentes gestões públicas e falta de organização.

4.4 A TECNOLOGIA SIG E O SOFTWARE HEC-RAS

A utilização de tecnologia SIG para modelagens computacionais tem sido amplamente utilizada em estudos diversos, por se tratar de uma abordagem sistêmica fácil de ser replicada em diversos locais através dos softwares desenvolvidos, a tecnologia rapidamente dominou o campo da geografia e engenharia que se utilizando desses processos já todos organizados dentro do programa, simplificam o trabalho de organização das informações. Os sistemas desenvolvidos para tais aplicações tem a vantagem de padronizar diversos métodos em uma análise previamente desenvolvida, facilitando sua aplicação nas pesquisas que podem ser concentradas mais na elaboração do estudo do que no desenvolvimento da metodologia, além disso, a aplicação dos programas facilita a comparação entre os diferentes estudos realizados, fazendo com que os resultados possam contribuir de forma consistente no desenvolvimento das pesquisas (PAIVA et al 2011).

A tecnologia se desenvolveu a partir da análise sistêmica, que preconiza a existência de um equilíbrio dinâmico, em que, existindo desequilíbrio, o sistema busca através de processos retomar o equilíbrio (CHRISTOFOLETTI, 1999). Tal abordagem adota a premissa da existência de elementos e um complexo de relações entre eles. Esses sistemas, portanto, podem ser do tipo isolado ou não isolado, dependendo da quantidade de interações existentes entre os elementos da análise e o ambiente ao qual está inserido.

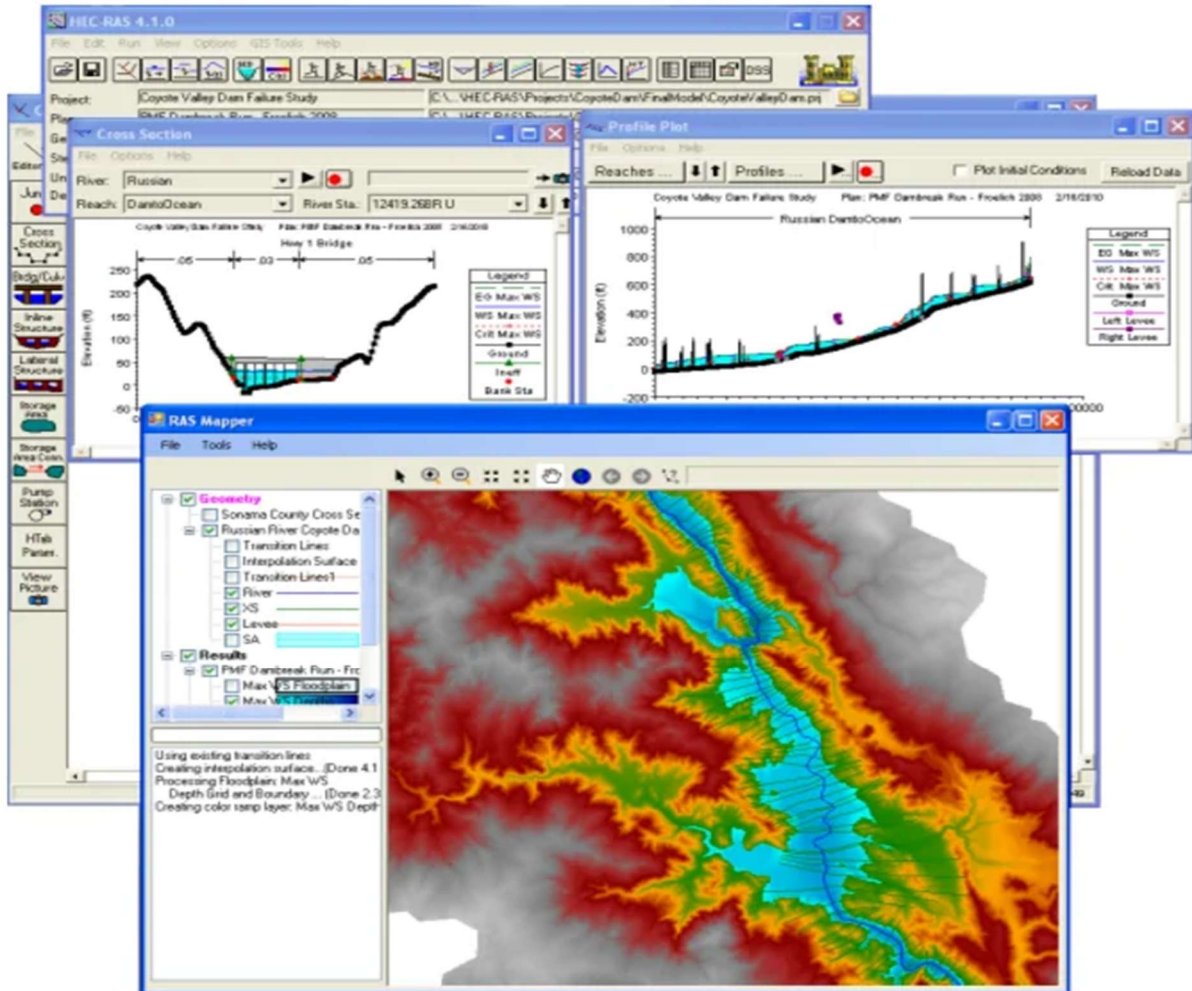
Na abordagem sistêmica existe uma entrada de dados, o processamento desses dados através das relações estabelecidas entre eles, e uma saída, que é o resultado das interações entre os elementos. Esse tipo de abordagem é bastante comum no meio computacional, onde é utilizado um computador, que possui a capacidade de processamento de informações e programas desenvolvidos para realizar o trabalho de análise das relações entre os elementos.

A ferramenta computacional tem se mostrado capaz de realizar diferentes tipos de tarefas, para a análise de risco de alagamentos, utilizando programa específico é possível reproduzir as condições locais de relevo e climatológicas, realizando assim experimentos sobre diversas condições possíveis de eventos climáticos, verificando o impacto sobre o local de estudo. Existem hoje diversos softwares que são utilizados para essa função, tais como MIKE 21, HEC-RAS, InfoWorks 2D, JFLOW, CCHE2D, PCSWMM e outros todos realizam análises de escoamento em rios e canais abertos, e são capazes de reproduzir o leito do rio e a planície de inundação (SHAHIRI PARSA et al 2016).

A escolha do HEC-RAS para geração das simulações de inundação ocorreu por sua ampla aceitabilidade no meio científico, frente a outros, que são em sua maioria pagos, o

Software está disponível gratuitamente em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (USA, 2023), na figura 6 vemos algumas janelas do programa em execução.

Figura 6: Janelas do software HEC-RAS.



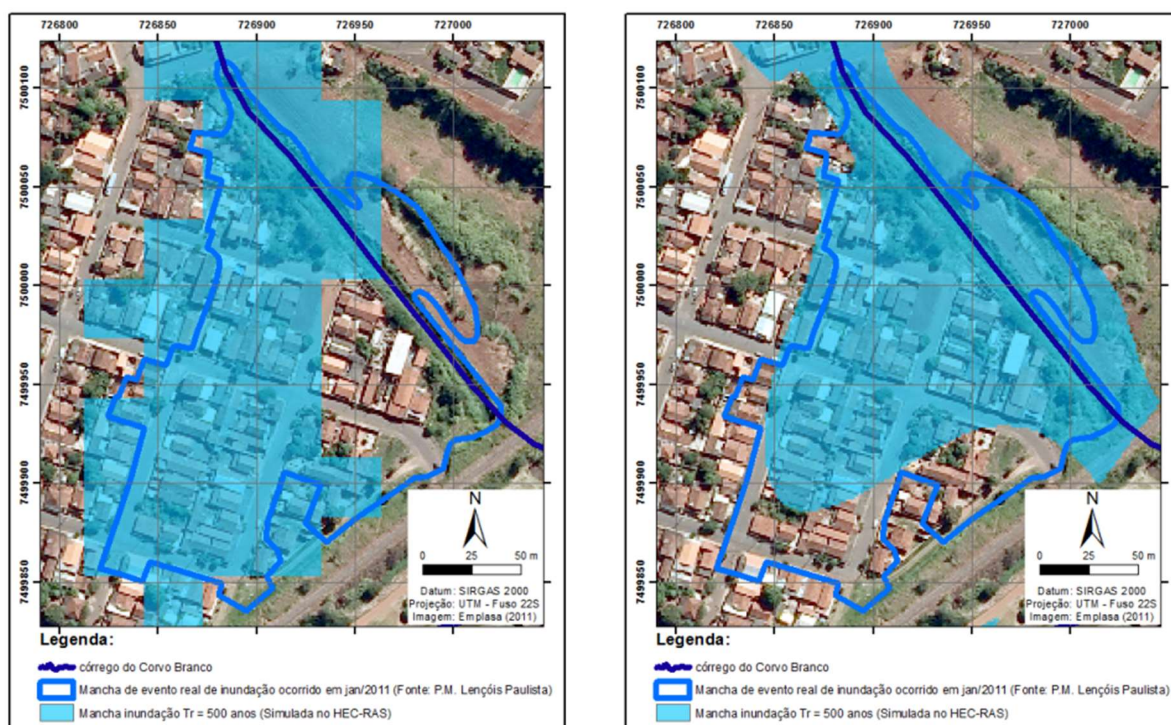
Fonte: Janelas do software HEC-RAS (USA, 2023).

Na Figura 6 temos as principais janelas do HEC-RAS abertas, RAS-Mapper que é possível uma visualização do modelo de elevação e a extração das seções transversais as seções extraídas e processadas e a janela principal do software. O programa utiliza como base a equação de conservação de momento de St. Venant, que considera a distribuição da água sobre o espaço físico, existindo variações na velocidade e na cota do nível de água. Dessa forma o programa simula a linha de energia entre uma seção transversal e outra, sendo a linha de energia correspondente perfil do nível de água. Além disso considera fatores como a rugosidade do leito, declividade, vazão e condições iniciais para calcular as elevações da água ao longo do

canal. O programa também pode considerar estruturas hidráulicas, como pontes e barragens, para avaliar seu impacto no fluxo e na inundação.

Estudos comparativos entre inundação urbana e os resultados obtidos pelo HEC-RAS em conjunto com modelos digitais de elevação como SRTM, (SILVA, 2017), (FALCETTA e CORSI, 2017) obtiveram resultados satisfatórios, na Figura 7 observa-se a semelhança entre a inundação ocorrida e a simulação.

Figura 7: Inundação em 2011 simulada no HEC-RAS, córrego do Corvo Branco – SP.



Fonte: Falcetta e Corsi, 2017

Na Figura é possível observar que a inundação produzida pelo software ao utilizar-se o SRTM e um levantamento topográfico (mancha azul) e a delimitação de uma inundação real, são bastante similares, principalmente se considerarmos o levantamento SRTM, nesse caso esteve mais próximo do que o levantamento topográfico.

Existem diversos estudos que utilizam também o modelo de elevação Alos Palsar, a aplicação direta de modelos de elevação disponíveis na internet, como o SRTM e Alos Palsar, conduz em muitos casos a resultados satisfatórios, Germano (2022) que realizou um estudo na cidade de Alegrete – RS, o estudo foi publicado na seção do Programa Gestão de Riscos e de Desastres da CPRM, e traz contribuições para trabalhos que utilizam a simulação como forma de prever os eventos de inundação, principalmente associando a técnica de utilização do HEC-

RAS, que é a principal ferramenta utilizada no mapeamento de inundação empregado no âmbito dos Sistemas de Alertas Hidrológicos (SAH's) (DEHID), da CPRM.

Nos levantamentos realizados pela CPRM, geralmente são precedidos de extensas campanhas de campo e são atendidos pelo programa os perímetros urbanos dos municípios que estão elencados para receber alertas e previsões hidrológicas, possibilitando a combinação de mapas e previsões para uma melhor experiência e resultado para os usuários. A técnica empregada majoritariamente pelo programa desenvolvido pela CPRM é a modelagem hidrodinâmica utilizando softwares como o HEC-RAS. Os mapas produzidos demonstram as áreas potencialmente inundáveis associadas a diferentes níveis de uma seção linimétrica e a diferentes períodos de retorno.

Nos estudos realizados por Germano (2022), foi analisada a metodologia utilizada pela CPRM, os resultados trouxeram boas impressões e limitações da utilização do software HEC-RAS e a utilização do modelo de elevação Alos Palsar. No estudo desenvolvido as principais conclusões são a boa representação dos efeitos de inundação utilizando somente o modelo de elevação, e a melhora significativa com o acréscimo de informações reais com a obtenção de dados topográficos e batimétricos.

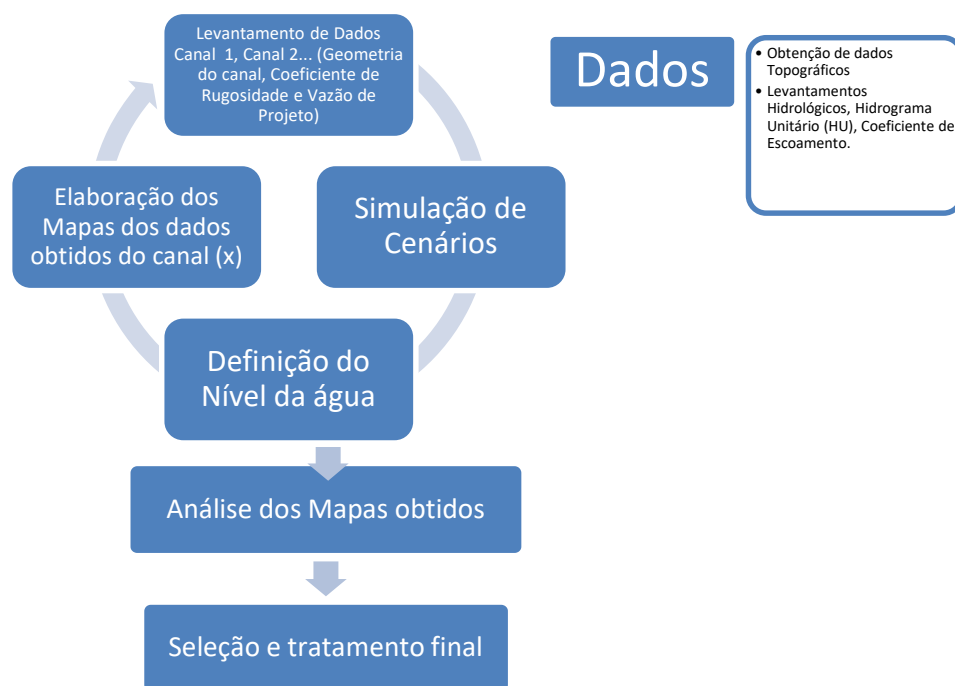
Em Boa Vista alguns estudos foram desenvolvidos utilizando tecnologia SIG. Araújo (2016) realizou um estudo amplo das bacias dos igarapés de Boa Vista, utilizando o critério da análise não somente física, delimitando locais historicamente susceptíveis a inundação, mas também socioeconômicos, assim, através do método de abordagem geossistêmica, são gerados mapas que unem as informações tanto de relevo e áreas susceptíveis a inundação, quanto mapas com separação de bairros e condição socioeconômica da população residente, sendo o objetivo a obtenção do mapeamento das áreas considerando não somente o critério do relevo, mas também a vulnerabilidade das pessoas que estão expostas aos eventos de inundação.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de modelagem para estudo de manchas de inundação utiliza por princípio a representação do mundo físico em um cenário criado através de técnicas e procedimentos (CHRISTOFOLETTI, 1999). Para compor esse cenário portanto são necessários elementos que possam reproduzir os fenômenos observados como os dados de Hidrologia a Geomorfologia e Hidrogeologia do terreno dentre outros, a seguir serão apresentados inicialmente informações dos dados de entrada na sequência irá ser discutida a forma de utilizar esses dados para dar sequência no processo de modelagem e simulação dos cenários.

Para melhor compreensão dos processos, a Figura 8 um Fluxograma com Etapas:

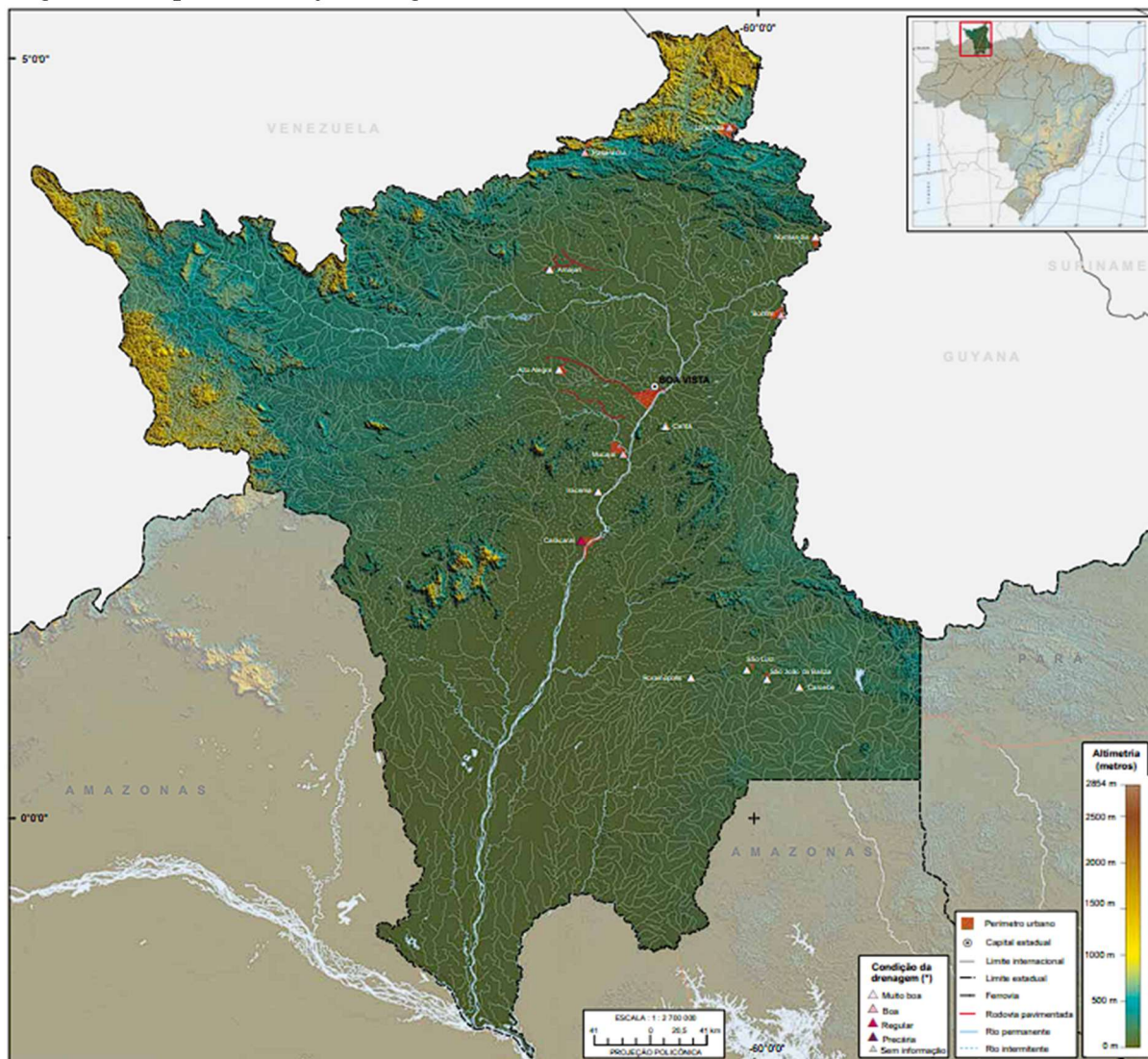
Figura 8: Fluxograma de metodologia da pesquisa



5.1 ÁREA DE ESTUDO

Boa Vista está localizada na porção a leste do Estado, conforme se observa na Figura 9, Boa Vista é a Capital do Estado de Roraima e maior cidade do estado com 436.591 habitantes segundo o IBGE, 2021 (BRASIL, 2021).

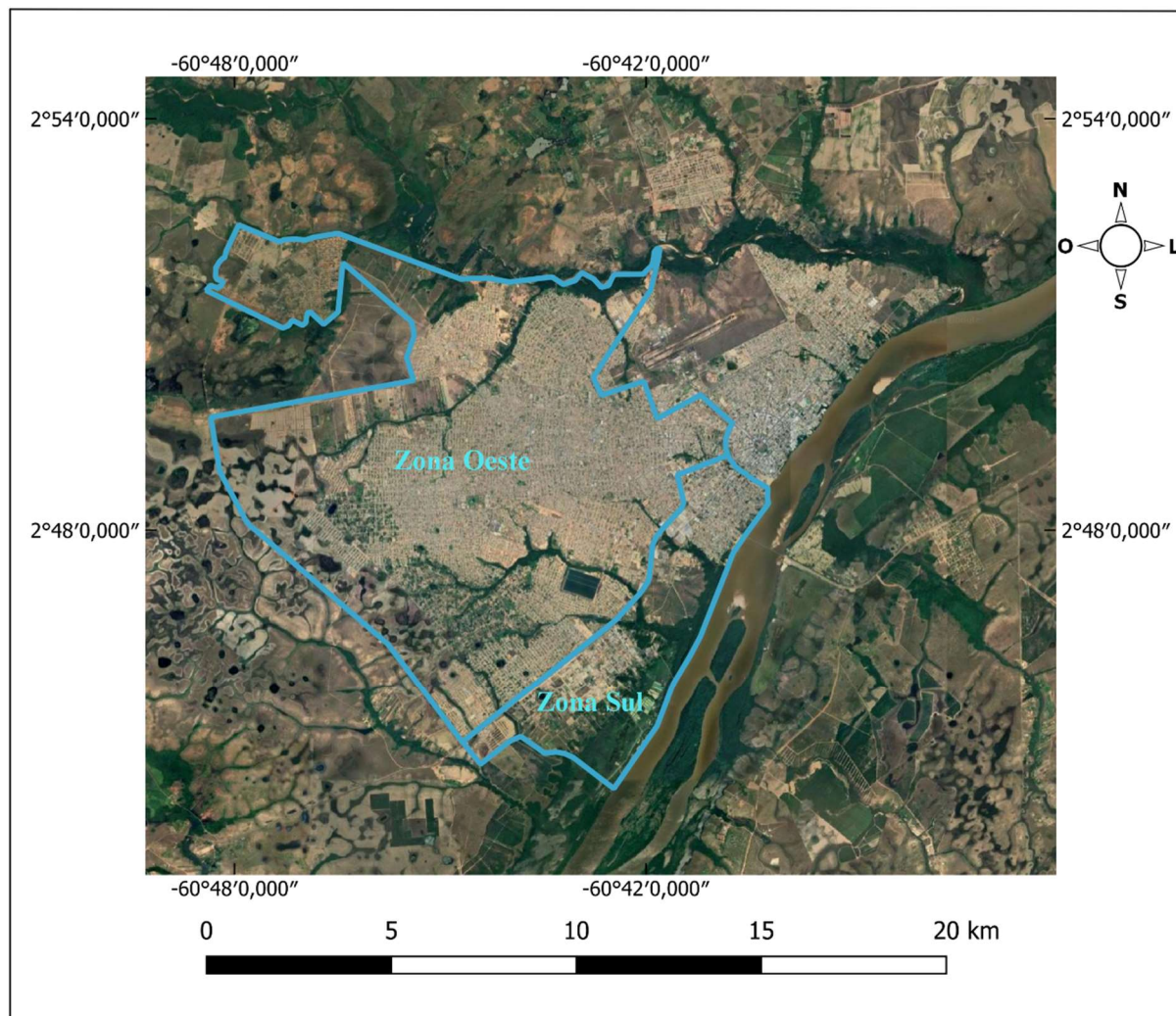
Figura 9: Mapa de Manejo de Águas Pluviais do Estado de Roraima



Fonte: Base de dados do IBGE, BRASIL (2011)

No mapa observa-se que a região possui uma extensa rede hidrográfica, Boa Vista situa-se às margens do principal rio que flui sobre o estado, o Rio Branco, a região onde localiza-se a cidade é caracterizada por baixa variação altimétrica. A seguir na Figura 10 é apresentado o mapa com as zonas oeste e sul de Boa Vista delimitadas. Observa-se a presença dos lagos naturais na direção da expansão da mancha urbana como também a presença das ilhas de mata que margeiam os igarapés onde ainda não houve supressão vegetal.

Figura 10: Imagem de Satélite com demarcação das zonas Oeste e Sul em Boa Vista.

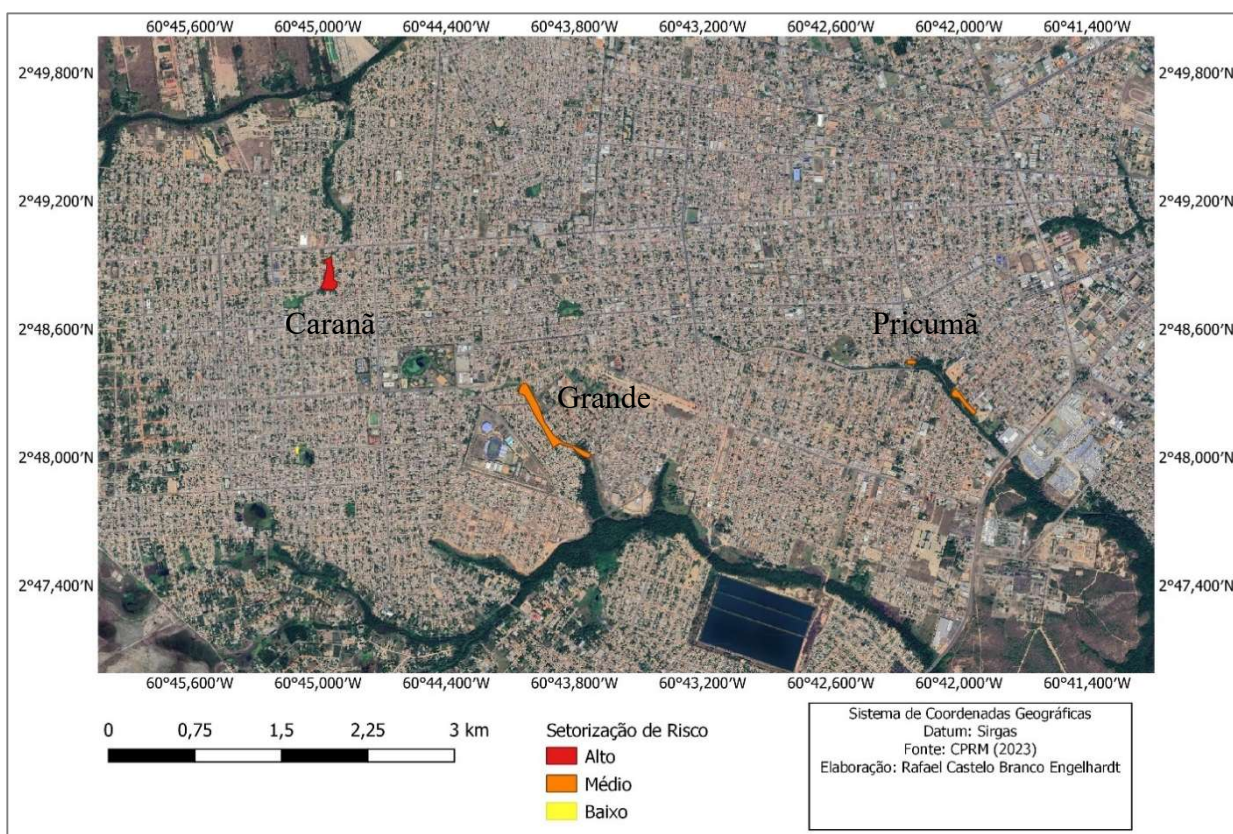


Fonte: Imagem modificada do Software Google Earth

A maior parte das áreas críticas de inundação conforme o Mapa para Prevenção de Desastres do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), se encontra nas zonas, oeste e sul de Boa Vista, essa parte da cidade o crescimento foi mais acelerado e desordenado, local de muitas nascentes de igarapés da zona urbana e de formações de lagos naturais.

As ocupações espontâneas ocorreram em terrenos localizados as margens de corpos d'água, suprimindo-os quando foi possível através de aterros realizados principalmente com materiais de descarte, entulho e outros, esse avanço do aterro foi ocasionando estrangulamento do sistema de drenagem natural do terreno e com a expansão da cidade pressionando cada vez mais devido à falta de espaço, muitas residências ficaram localizadas nessas áreas de risco, o mapeamento dessas áreas mais críticas em Boa Vista pela CPRM resultou em 3 pontos principais conforme a Figura 11.

Figura 11: Em vermelho e laranja, áreas de risco e o nome dos igarapés em Boa Vista.



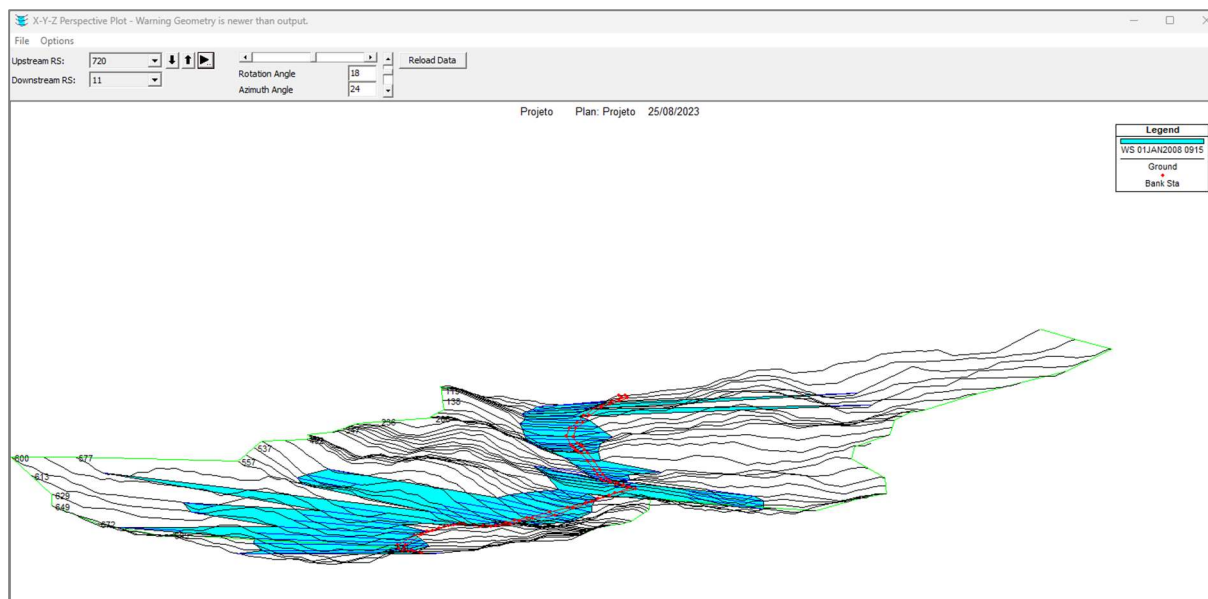
Fonte: Mapa para Prevenção de Desastres CPRM, (BRASILa, 2022)

Na Figura é possível observar 4 pontos com setorização de risco em 3 igarapés, 2 maiores que correspondem a áreas de planície de inundação dos Igarapés Grande e Caranã e 2 menores ao longo do Igarapé Pricumã.

A metodologia utilizada para a simulação das inundações é mais propícia para áreas maiores, ou seja, nesse caso as planícies de inundação têm dimensões que possibilitam melhor assertividade na aplicação de MDE com resolução maior, como é o caso dos modelos gratuitos Alos Palsar e MERIT. Dessa forma as simulações foram desenvolvidas nas áreas de risco com maiores dimensões, nos Igarapés Grande e Caranã.

Outra situação que foi possível observar, principalmente durante visitas ao local e no processo de simulação, é que a área crítica do igarapé Caranã sofreu intensa modificação antrópica, o terreno hoje encontra-se muito descaracterizado em relação ao relevo original o que dificulta a utilização de MDE que tem como fonte dados o levantamento SRTM da NASA, missão desenvolvida anos 2000. Foram realizados testes no HEC-RAS utilizando MDE Alos Palsar e MERIT, porém nos dois casos os resultados apontam para uma discrepância do relevo atual que tornaram a análise incipiente utilizando o método descrito. Na Figura 12 podemos observar o terreno em sua forma mais próxima do natural.

Figura12: Janela mostrando resultado da simulação.



Fonte: Visualização de janela do HEC-RAS

É possível observar que o relevo é levemente ondulado, e que a água se espalha facilmente sobre a superfície, diferente da situação atual, em que existe um sistema de valas que direciona a água e aterro da planície de inundação para construção de moradias, conforme se observa na figura 13.

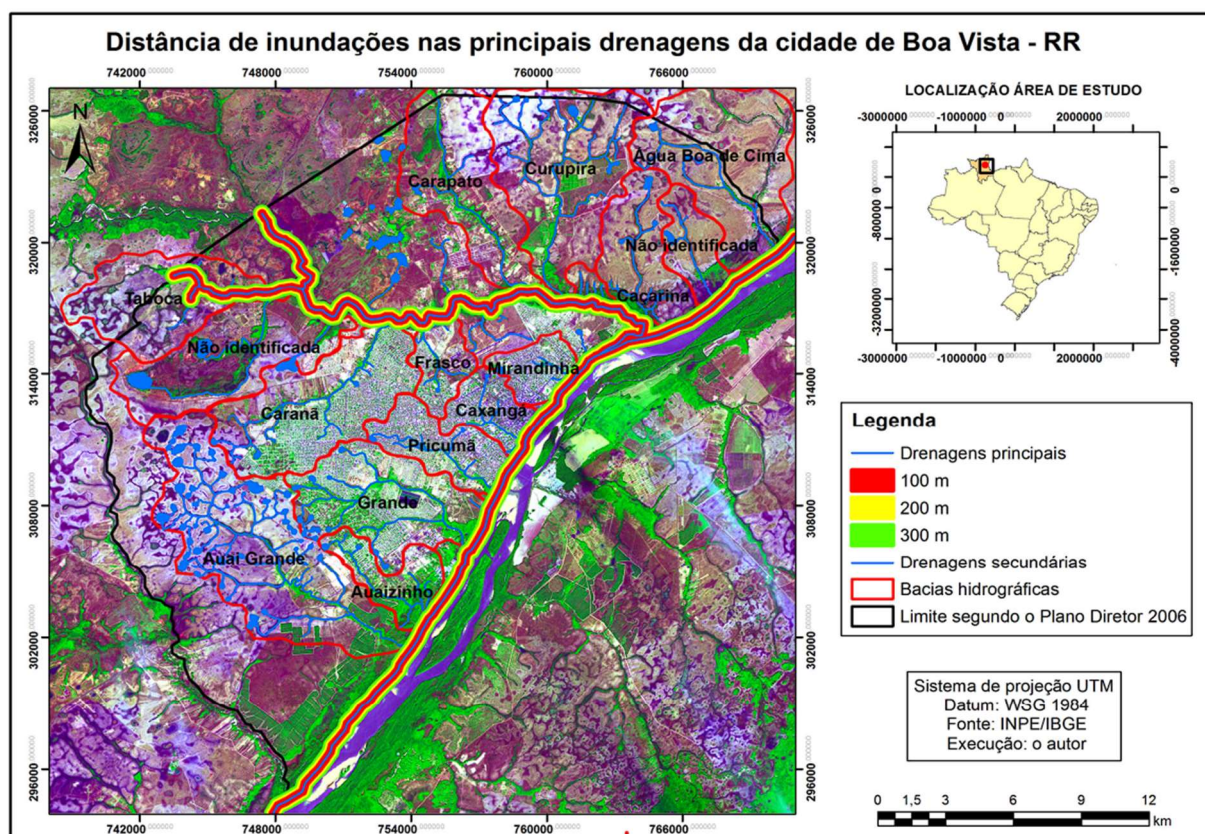
Figura 13: Ocupação de área de lagoa e vala.



Na cidade a construção de valas e posterior canalização foi o principal instrumento utilizado para minimizar as inundações. A canalização dos trechos de igarapé e valas com concreto armado ordenaram o fluxo e evitam que essas residências feitas dentro da área de influência de cheias dos igarapés sejam inundadas (ARAÚJO, 2016).

A área de estudo dessa pesquisa, portanto, bacia dos igarapés considerados críticos para ocorrência de alagamentos, encontra-se toda na região urbana do município de Boa Vista, na zona oeste e sul da cidade, na Figura 14 podemos observar a delimitação das bacias dos Igarapés Urbanos de Boa Vista.

Figura 14: Mapa com as bacias dos igarapés Urbanos de Boa Vista – RR



Fonte: Araújo (2016)

O Igarapé Pricumã encontra-se praticamente todo canalizado, no momento a obra de finalização da canalização do trecho até as proximidades do Rio Branco já se encontra em licitação, já os Igarapés Grande e Caranã são mais preservados e a maior parte flui em leito natural.

5.1.1 Curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

A Região onde está inserido o município de Boa Vista difere em muitos aspectos do restante da região norte, o clima predominante pela classificação Köppen é Aw Tropical de Savana, enquanto que as demais regiões amazônicas se enquadram em Af Clima equatorial ou Am Clima de monção, essa característica climática faz com que sejam necessários estudos regionais para definição dos parâmetros de precipitação, sendo muito difícil o aproveitamento de dados por exemplo de regiões mais desenvolvidas próximas como Manaus – AM.

Para a modelagem hidrológica, foram utilizadas as equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) desenvolvida por Carvalho (2007) e a de Brands (2022) que concentraram seus estudos para obtenção da Curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) dentro da área do município de Boa Vista, publicadas em dissertações de mestrado as fórmulas são utilizadas para elaboração dos projetos de drenagem urbana desenvolvidos na região.

Na modelagem final foi utilizada a (IDF) desenvolvida por Carvalho (2007).

$$i_m = \frac{951,57 * T^{0,161}}{(t+12)^{0,76}} \text{ (Carvalho)} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$i_m = \frac{1026,68 * T^{0,181}}{(t+11,63)^{0,757}} \text{ (Brands)} \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

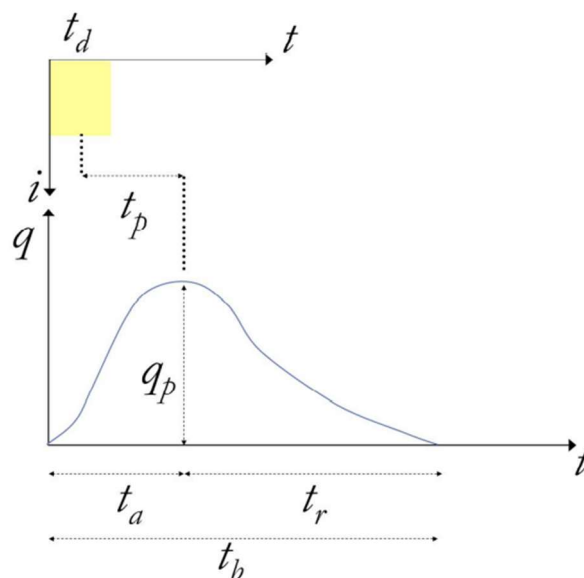
i_m = intensidade de precipitação pluviométrica média das máximas, (mm/h);

T = período de retorno;

t = duração da precipitação pluviométrica, em minuto;

A obtenção do parâmetro vazão é feita descontando a parcela das precipitações que infiltra no solo, já que o estudo se concentra nos efeitos do escoamento superficial, portanto, é necessária uma análise detalhada dos elementos de solo que permitem maiores infiltrações ou não, o que em uma cidade se torna bastante complexo, sendo necessária a utilização de imagens de satélite para definições mais precisas. Para essa tarefa é utilizado o hidrograma unitário (HU), que indica o volume escoado de acordo com a precipitação, uma ferramenta muito útil para esse fim é o HU do SCS apresentado na Figura 15 os HU de modo geral são compostos por:

Figura 15 – Hidrograma Unitário, parâmetros estudados



Fonte: Monteiro et al., (2015)

Nessa Figura são apresentados os principais parâmetros para definição das vazões, onde:

- t_d = duração da precipitação;
- t_p = diferença entre os tempos de pico do hidrograma e do ietograma;
- q_p = vazão de pico;
- t_a = tempo de ascensão do HU;
- t_r = tempo de recessão do HU;
- t_b = tempo de base do HU.

A obtenção dos hidrogramas de chuva para simulação das vazões nos igarapés é essencial pois permite uma boa aproximação do comportamento dos igarapés durante a chuva, utilizando o programa HEC-HMS é possível a obtenção desse parâmetro, adicionando-se os dados de área da bacia, tempo de concentração e o método de perda ou infiltração é possível criar modelos de hidrogramas e hietogramas para serem utilizados na simulação (USA, 2023).

5.1.2 Relevô

A área urbana do município pode ser classificada de forma simplificada como uma extensa região plana, com altitudes variando entre 80 – 150 m (SANDER, 2015), as zonas leste e sul onde estão localizadas as bacias dos igarapés seguem essa mesma classificação.

Em Boa Vista a prefeitura tem conseguido nos últimos anos preservar na maioria dos casos as margens dos igarapés, através da criação de leis e da atuação das secretarias de meio ambiente e da EMHUR (Empresa de Desenvolvimento Urbano e Habitacional) evitando o surgimento de ocupações nas áreas alagáveis, em alguns trechos, porém, pessoas conseguiram se estabelecer nas proximidades e a tendência é cada vez mais se aproximarem dos cursos

d'água, em outros estão sendo desenvolvidas atividades agrícolas, essas ocupações recentes são as mais susceptíveis a inundações.

Os dados de relevo foram obtidos através do programa QGIS, utilizando a ferramenta GRASS e o recurso `r.watershed` e `r.water.outlet`, que possibilita a extração dos dados de bacia do raster, como área da bacia, forma da bacia e o tempo de concentração.

A disponibilização do MDE é feita em site próprio, sendo necessário procurar pelo arquivo referente as coordenadas N 02 W 061 correspondente à região geográfica que abrange parte dos municípios de Boa Vista, Cantá, Iracema e Bonfim, além de realizar a solicitação de permissão de utilização do modelo digital.

Após baixar o arquivo são necessários tratamentos para que os dados possam ser inseridos no programa HEC-RAS, assim é necessário fazer o recorte das áreas de interesse. Utilizando um programa GIS, pode-se utilizar a ferramenta cortar através de polígono. Na ferramenta de nova camada é necessário selecionar o polígono e então criar uma forma geométrica que corresponda a área a ser estudada, sempre utilizando o mesmo sistema de coordenadas do arquivo em que se está trabalhando.

Após delimitar a área com o polígono a extração é feita com a ferramenta recortar raster por camada de máscara, sendo o resultado uma nova camada com os dados extraídos. Com a extração feita é necessário a conversão para arquivos que o HEC-RAS reconhece através da ferramenta de conversão do programa, os arquivos suportados são raster no formato (.flt), esri grid (.adf), e GeoTiff (.tif).

Para verificação e validação dos dados topográficos pode ser utilizado o dado real de levantamento amostral, feito através de visita em campo por topógrafo, os dados portanto são comparados com os obtidos nos modelos de elevação de forma visual através de visita e podem ser comparados com os obtidos através de levantamento topográfico, na Figura 18 observa-se o modelo digital já inserido no programa HEC-RAS.

5.1.3 Estudo da Bacia hidrográfica

Após a definição do Modelo de Elevação, existe a necessidade de conhecer o fluxo dentro da bacia. É um processo em que, atualmente, é feito tratamento desse modelo digital utilizando software GIS, para a obtenção de parâmetros morfológicos de área da bacia fator de forma, tempo de concentração, índice de sinuosidade, densidade de drenagem, comprimento do rio principal e perímetro da bacia, as etapas desse processo são:

- Identificação e extração da rede de drenagem da bacia hidrográfica com base nos dados de elevação. Com a aplicação de algoritmos de software GIS específicos para identificar os cursos d'água e a hierarquia da rede fluvial, é possível extrair a rede de drenagem e a abrangência da bacia sobre o terreno.

- Delimitação precisa da área da bacia hidrográfica com base nos pontos de divisão de águas, que também é possível ser feito através de software GIS.

- Extração de Parâmetros Morfológicos

- Índices Morfométricos: Cálculo de índices que descrevem a forma e características da bacia, como o índice de forma da bacia.

- Validação e Comparação visual: Verificação da consistência dos resultados obtidos e comparação visual dos parâmetros morfológicos, se necessário, com base em dados de campo ou referências adicionais.

- Modelagem Hidrológica: Utilização dos parâmetros morfológicos na modelagem hidrológica para simulação de processos como escoamento superficial, infiltração e resposta hidrológica da bacia.

- Visualização e Análise: Representação gráfica dos resultados por meio de mapas, perfis e outras visualizações para análise e interpretação.

Após essas etapas foram gerados elementos suficientes para caracterizar o modelo de elevação e serem previstas as formas de ocorrência de problemas na bacia, que podem estar relacionados ao relevo somente, delimitando-se dessa forma pontos com potenciais de ocorrências de inundação a serem estudados.

5.1.4 Coeficiente de Manning

Para que o processo de modelagem fique completo foi necessário incluir também informações referentes a rugosidade do terreno, essa informação é obtida através do coeficiente de Manning, e representa a parcela de redução da velocidade da água em relação ao tipo de superfície ao qual esse fluxo de água percorre, na Tabela 1 observa-se a descrição do tipo de cobertura e o coeficiente equivalente para cada Igarapé.

Tabela 1 – Coeficiente de Manning

Igarapés	Coeficiente Normal
Grande (nascentes e canais secundários) Trechos com bastante vegetação, poças profundas com presença de alguma obstrução.	0,100
Grande (principal) Trecho limpo, sinuoso, com algumas piscinas naturais.	0,040
Caranã (nascentes e canais secundários) Trechos com bastante vegetação, poças profundas com presença de alguma obstrução.	0,100
Caranã (principal) Trecho limpo, sinuoso, com algumas piscinas naturais.	0,040
Pricumã (Principal) Trecho limpo, retilíneo sem presença de poças.	0,030

Fonte: USA (2016)

Esses coeficientes foram escolhidos de acordo com o tipo de canal existente nos igarapés, levando em conta a descrição do manual do Usuário do HEC-RAS versão 5.0.

5.2 SIMULAÇÃO E CONFECÇÃO DOS MAPAS

O processo de modelagem para simulação dentro do HEC-RAS começa com a criação de um novo projeto na janela principal do programa, na sequência são utilizadas as janelas auxiliares para dar sequência as etapas de extração de dados do relevo, que servirão de modelo digital para definição dos elementos da bacia do igarapé, depois de simulação do evento com a entrada de dados de vazão e coeficiente de escoamento.

Quando se realiza a simulação, o programa cria através dos dados inseridos uma animação em escala de tempo reduzida, onde é possível obter os resultados visualizando no tempo e condições meteorológicas em que ocorrerá o pico da inundação.

O processo de simulação começa de acordo com o organograma (Figura 2) com a obtenção do banco de dados, o primeiro dado levantado é a Área de bacia, no caso do igarapé Grande 5.264.200,00 m² a área se refere apenas a contribuição do trecho a ser estudado, e não ao igarapé completo.

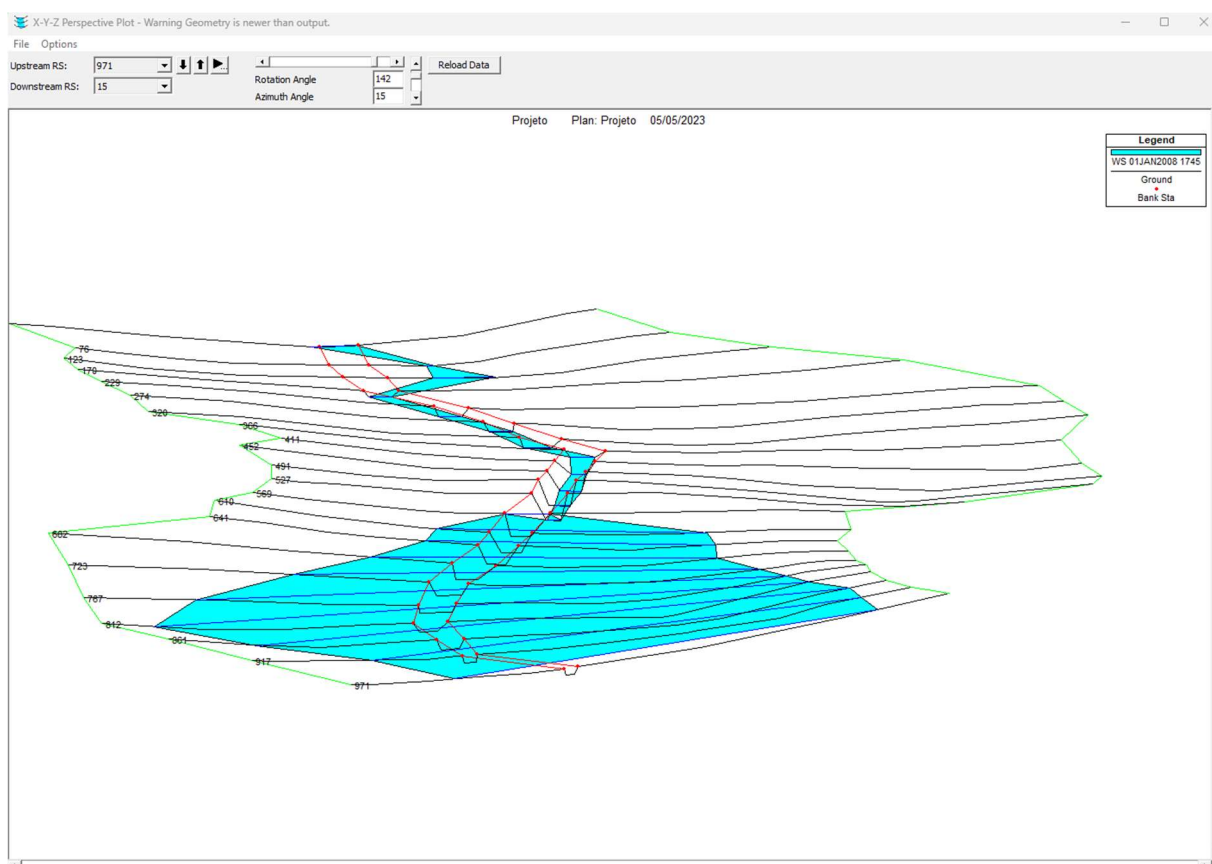
5.3 CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

Nessa seção os dados serão analisados e apresentados descrevendo os procedimentos adotados.

5.3.1 Igarapé Grande

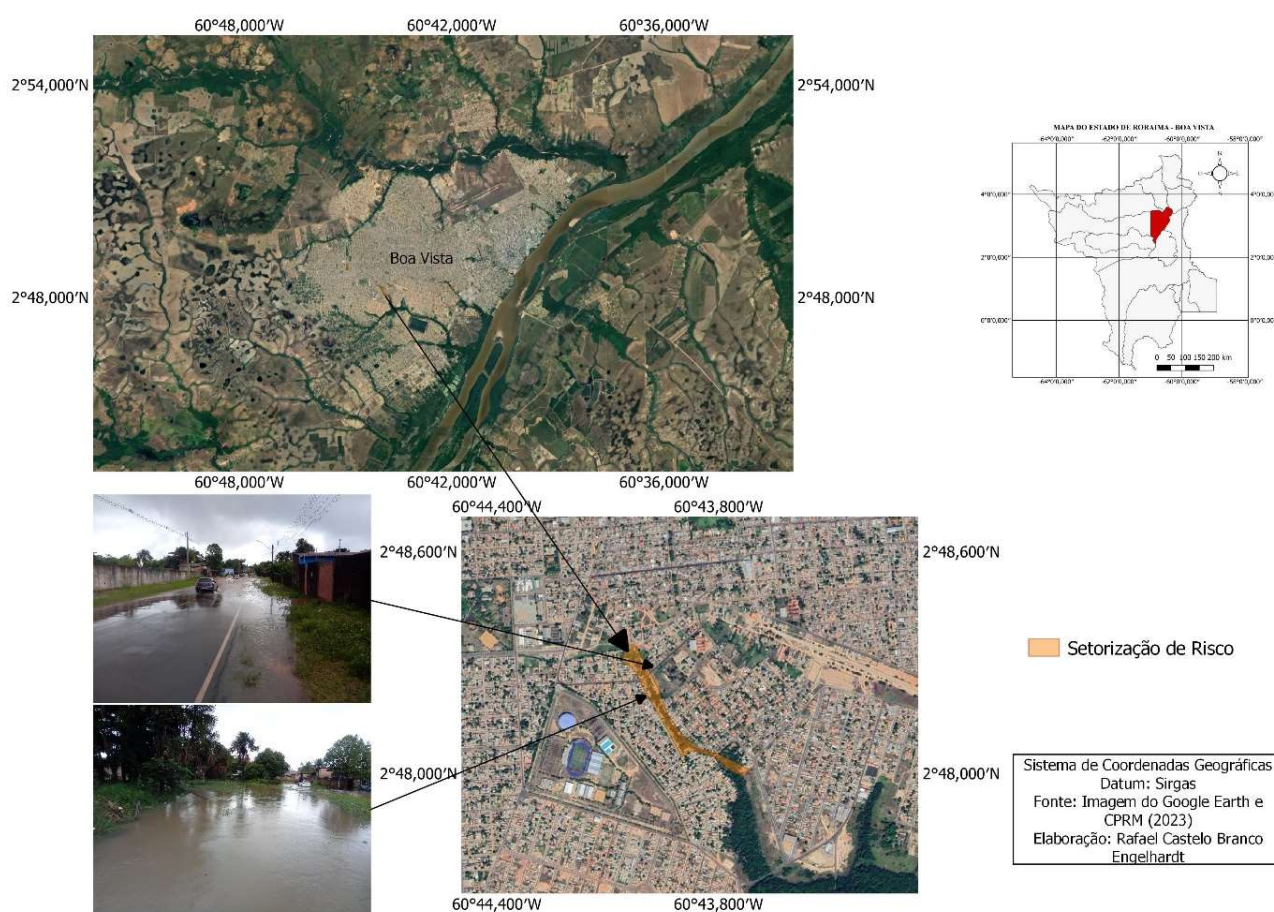
Esse trecho localiza-se entre as ruas Cambará no bairro Olímpico e a rua Manganês no Jôquei Clube, e é formado por uma área de planície de inundação a montante que é represada por uma elevação no terreno conforme é observado na Figura 16.

Figura 16: Visualização dos efeitos da inundação no terreno.



Durante o período chuvoso diversas vezes ocorrem inundações conforme os registros feitos por reportagem do G1 no inverno de 2022, na Figura 17 são apresentadas fotos com efeitos da inundação causada pela chuva ocorrida dia 19/05/2022, a água cobre a ponte que liga os bairros Olímpico e Jôquei Clube de Boa Vista e chega a ocupar os quintais e algumas residências.

Figura 17: Mapa com fotos de situações de inundação.



Fonte: CPRM, (BRASILb, 2022).

Segundo as informações disponíveis no Mapa para Prevenção de Desastres, são 40 edificações localizadas nessa área de inundação, com 160 pessoas afetadas diretamente, o grau de vulnerabilidade é considerado médio porque as casas em sua maioria são de alvenaria e não de madeira por exemplo, o que aumentaria a vulnerabilidade e o grau de risco é alto, conforme descrições do risco disponibilizadas pela CPRM:

“Descrição: Moradias construídas na planície de inundação (várzea) do igarapé que atravessa este setor. Assoreamento do canal de drenagem. Lançamento de esgoto e água servida no igarapé.

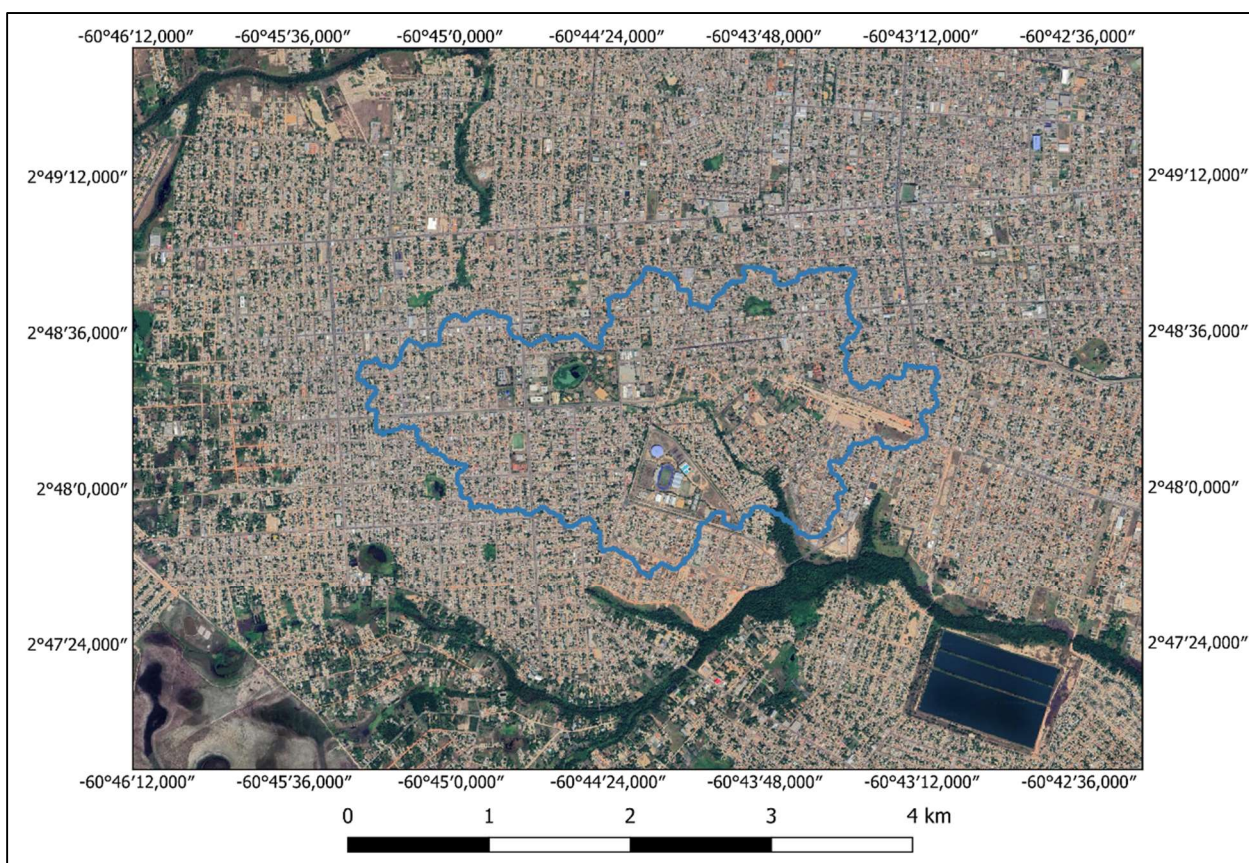
Sugestão Intervenção: Impedir novas edificações em planícies de inundação.

Realizar obras estruturais e implantar drenagem e esgoto.

Monitorar as moradias em risco e caso necessário remover temporariamente os moradores.” (BRASILa, 2022)

No programa HEC-RAS é possível realizar pequenas alterações nas seções transversais extraídas do MDE para adicionar barreiras naturais ou qualquer outra estrutura que não esteja presente no modelo, devido à baixa resolução do MERIT, que foi utilizado nesse caso devido à elevada presença de vegetação, sem tratamento o leito menor do igarapé não aparece, para isso foi utilizada a função do HEC-RAS “Graphic XS Editor” sendo acrescentado desnível compatível com o visualizado no local com secção média de 1m x 15m , a Figura 18 mostra a área da bacia, delimitada utilizando o modelo ALOS PALSAR e o software QGIS.

Figura 18: Delimitação da bacia sobre a imagem de satélite de Boa Vista.



Para análise da forma bacia pode ser aplicando a fórmula para o cálculo do Índice de Conformação:

$$F_c = \frac{A}{L^2}, = 0,97 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

A = Área da bacia, (km²);

L = Comprimento axial da bacia, (km);

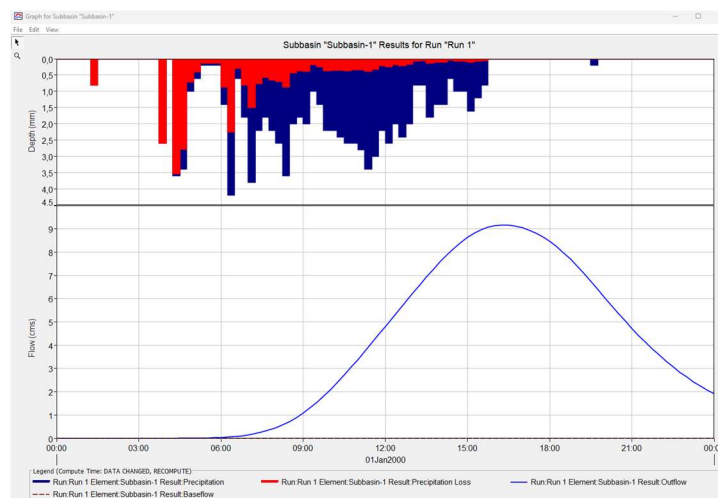
O índice (F_c) expressa a capacidade da bacia de gerar enchentes, utilizando os dados obtidos percebe-se que se aproxima de 1, o que indica um formato que tende a ter maior concentração de fluxo e por isso a aumenta a propensão aos desastres.

A área total da bacia é de 5.264.200,00 m² e o tempo de concentração de 300 min.

Foi possível observar durante as simulações que ocorre um acúmulo de água devido a mudança do relevo, esse efeito se acentuou aparentemente devido as ocupações irregulares pelo processo de aterro realizado pelos moradores para ocupação das áreas que margeiam o igarapé e durante eventos de chuva com duração suficiente para que toda a área da bacia esteja contribuindo para o fluxo, ocorre o acúmulo de água conforme pode ser visto na Figura 18 que foi gerada a partir de simulação para verificação e comparação visual do modelo com situação de precipitação que ocorreu no local.

Foram utilizados na simulação, dados pluviométricos obtidos do sistema HIDRO – Telemetria, <https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/serieHistorica.aspx>, para o dia 25/04/2023, o período da chuva foi de 11 hs e 45 min e não foi um evento de grande intensidade, as 6:30 ocorreu o período de 15 min de chuva mais intenso, com 4,2mm de precipitação registrados, conforme visita em loco constatou-se semelhança dos efeitos visualizados com o resultado da simulação, o que ajuda a validar o modelo, na Figura 19 é apresentado o hidrograma e hietograma gerados pelo programa HEC-HMS para essa chuva.

Figura 19: Hietograma e Hidrograma para a chuva do dia 25/04/2023.



No gráfico de cima vemos a altura milimétrica acumulada, cada intervalo das barrinhas representa 15min de chuva, em vermelho a precipitação que infiltrou no solo e azul escuro a chuva excedente, que escoou pelo sistema, abaixo no hidrograma vemos a escala de tempo e a vazão a montante do canal, utilizada para a realização da simulação, que para essa chuva alcançou um pico de 9,2 m³/s.

Com o MDE do terreno calibrado para essa chuva real, em que observou-se semelhança da inundação produzida pelo HEC-RAS, foram realizadas novas simulações utilizando a equação de chuva para prever eventos climáticos mais intensos, com períodos de retorno maiores.

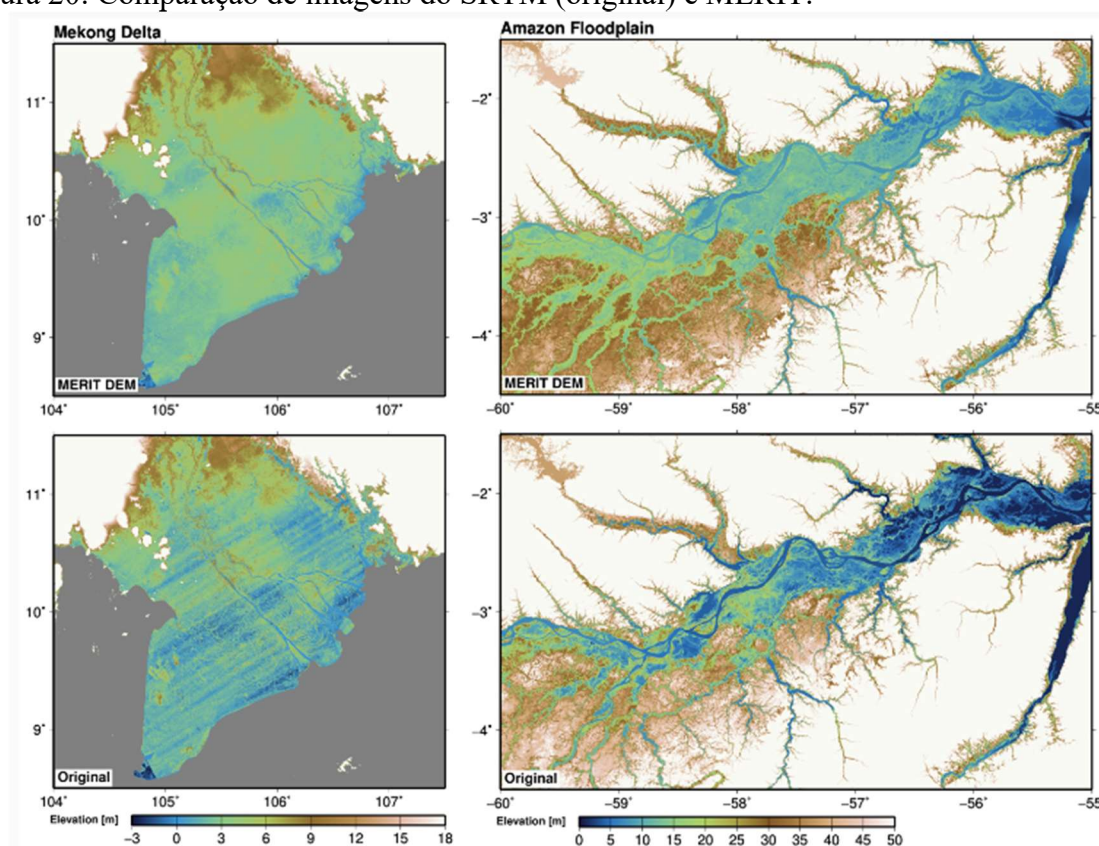
Foram considerados 3 períodos de retorno para a simulação, 5, 10 e 20 anos, em cada caso foi calculado utilizando a equação de chuva, as alturas milimétricas considerando os mesmos intervalos de 15 min, as informações obtidas para a duração de 1 dia foram inseridas no HEC-HMS para obtenção dos dados de vazão e em seguida esses dados foram transferidos para o HEC-RAS fazer as simulações.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para representar o relevo são utilizados modelos de elevação digital globais disponíveis na internet, pois para o estado de Roraima não foi possível encontrar levantamento topográfico próprio ou do tipo LIDAR disponível para acesso público, os Modelos de Elevação (MDE) disponibilizados gratuitamente foram criados a partir do programa SRTM da NASA desenvolvido nos anos 2000, esse modelo teve diversas correções e a resolução inicial caiu para 12,5m x 12,5m com a atualização ALOS PALSAR (USA, 2022).

Segundo Chai et al (2022) que comparou a quantidade de erros dos modelos de elevação gratuitos SRTM, ALOS PALSAR, ASTER, TanDEM-X, EarthEnv-DEM90 e MERIT, o modelo MERIT que utiliza dados dos levantamentos SRTM, JAXA AW3D (Japão, 2023) e Viewfinder Panoramas (Viewfinder Panoramas, 2023) combinados, apresentou resultados melhores quando comparado com o levantamento LiDAR, que tem precisão de 1m x 1m e foi realizado com auxílio de avião, o modelo MERIT tem resolução de 90m x 90m (YAMAZAKI, 2018), na Figura 20 é apresentado uma comparação dos modelos.

Figura 20: Comparação de imagens do SRTM (original) e MERIT.

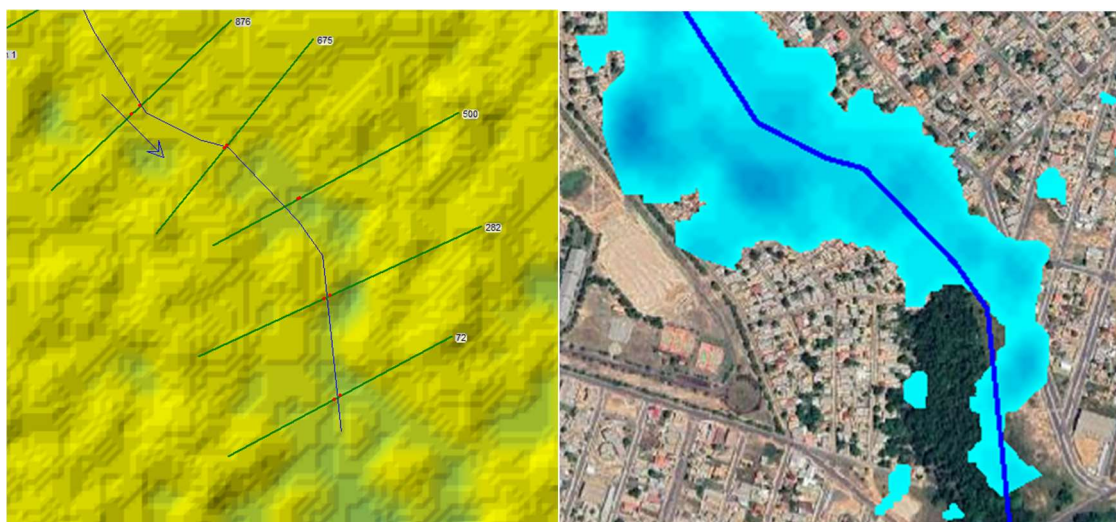


Fonte: Imagem disponibilizada pelo Yamazaki Lab, (2024).

De acordo com as informações disponíveis no site do Yamazaki Lab, do Instituto de Ciências Industriais da Universidade de Tóquio, no modelo MERIT foram separados e filtrados diversos erros incluindo os causados pelas árvores, que em regiões planas influenciam muito nos resultados (YAMAZAKI, 2018).

A simulação em região de pouca alteração altimétrica como é o caso de Boa Vista, qualquer erro pode mudar muito o curso da água, e considerando também que o local principal da simulação ocorre no leito dos igarapés e o mesmo é densamente ocupado pelas ilhas de florestas, os erros acabam criando diversas elevações e buracos que não existem no terreno, cada mudança se torna portanto uma barreira difícil da água transpor, represando e causando um efeito que não representa o movimento natural sobre o solo, isso foi perceptível durante o processo de simulação do igarapé Grande e conforme se observa na Figura 21 na janela de simulação utilizando o MDE ALOS PALSAR.

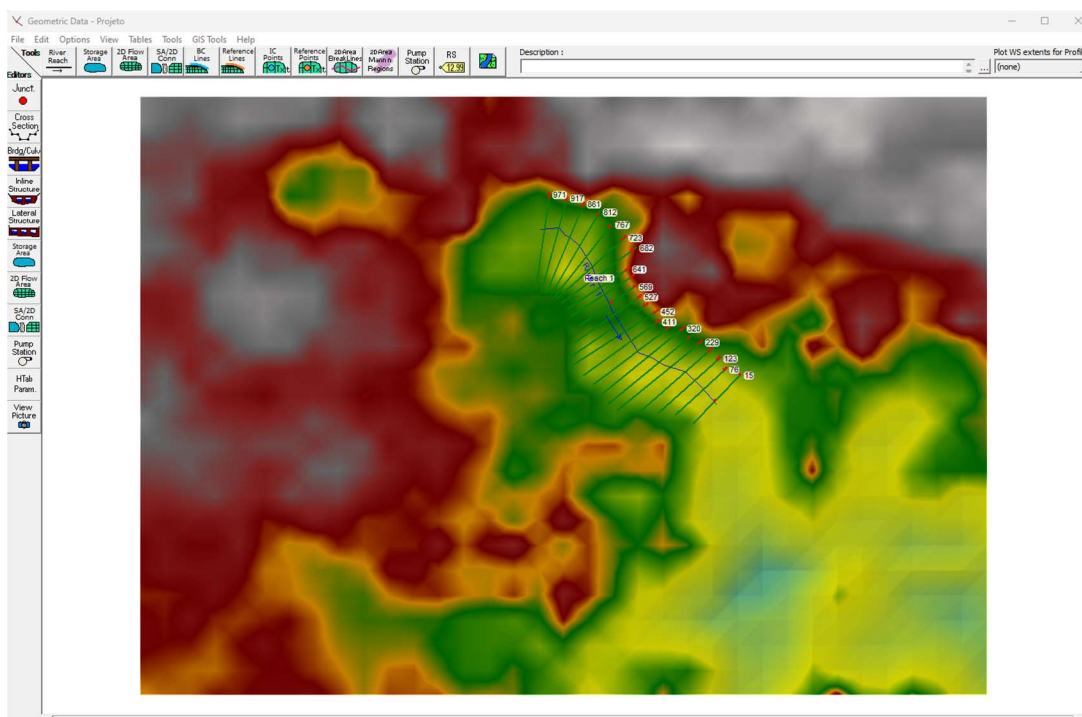
Figura 21: Ondulações no curso do igarapé



Observa-se pela imagem que a presença dos erros altera significativamente o deslocamento da água quando realizada a simulação, a jusante percebe-se que desvia da área de floresta, inclusive e flui sobre a avenida que está em cota bem mais alta que o leito do igarapé.

Em locais de baixa incidência de vegetação, e principalmente onde existe elevada presença de lagos naturais, o MDE Alos Palsar se mostrou mais interessante, devido a maior resolução que caracteriza melhor o terreno marcado por lagoas naturais.

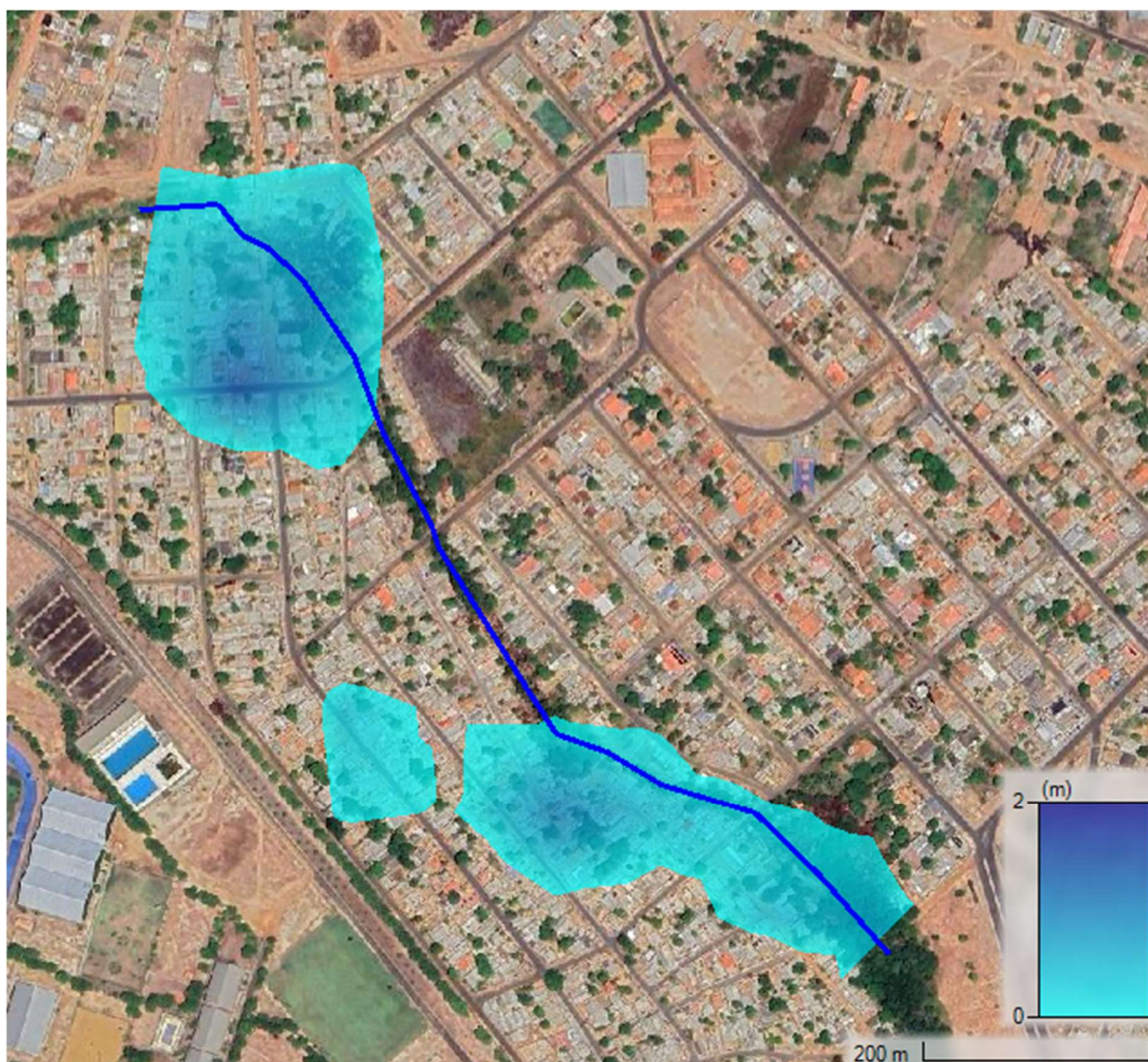
Figura 22: MDE com trecho do Igarapé Grande.



Na Figura 22, em que foi utilizado o MERIT é possível perceber que existe uma maior continuidade no terreno, mais condizente com a realidade na parte onde existe presença de floresta.

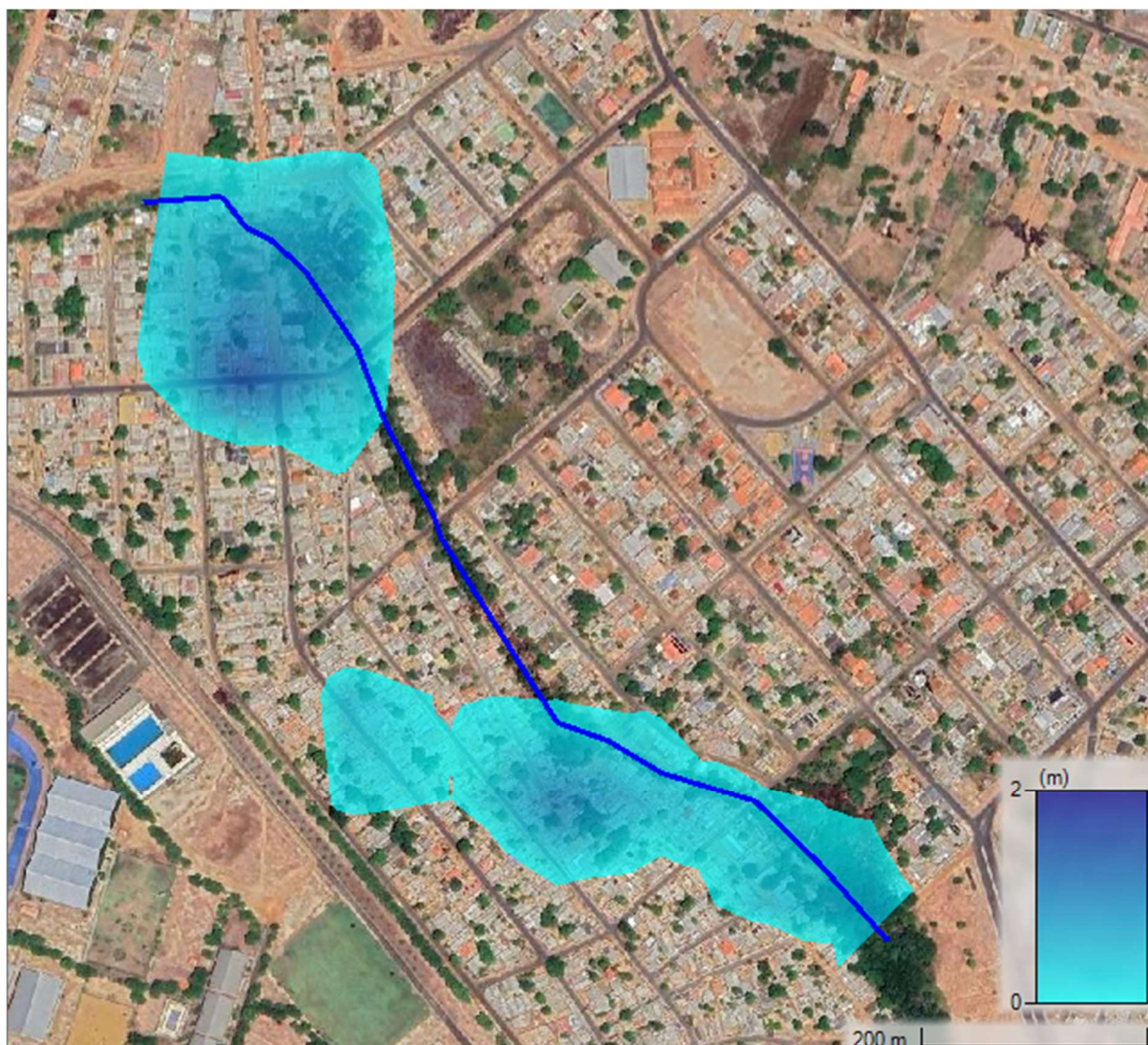
Nas Figuras 23, 24 e 25 observa-se a simulação utilizando chuvas previstas com a Curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF), os resultados apresentados no mapa representam os efeitos no terreno de evento climático previsto utilizando a Curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para a Bacia Hidrográfica do Igarapé Murupu com período de retorno de 5, 10 e 20 anos.

Figura 23: Mancha de inundação para Período de Retorno de 5 anos.



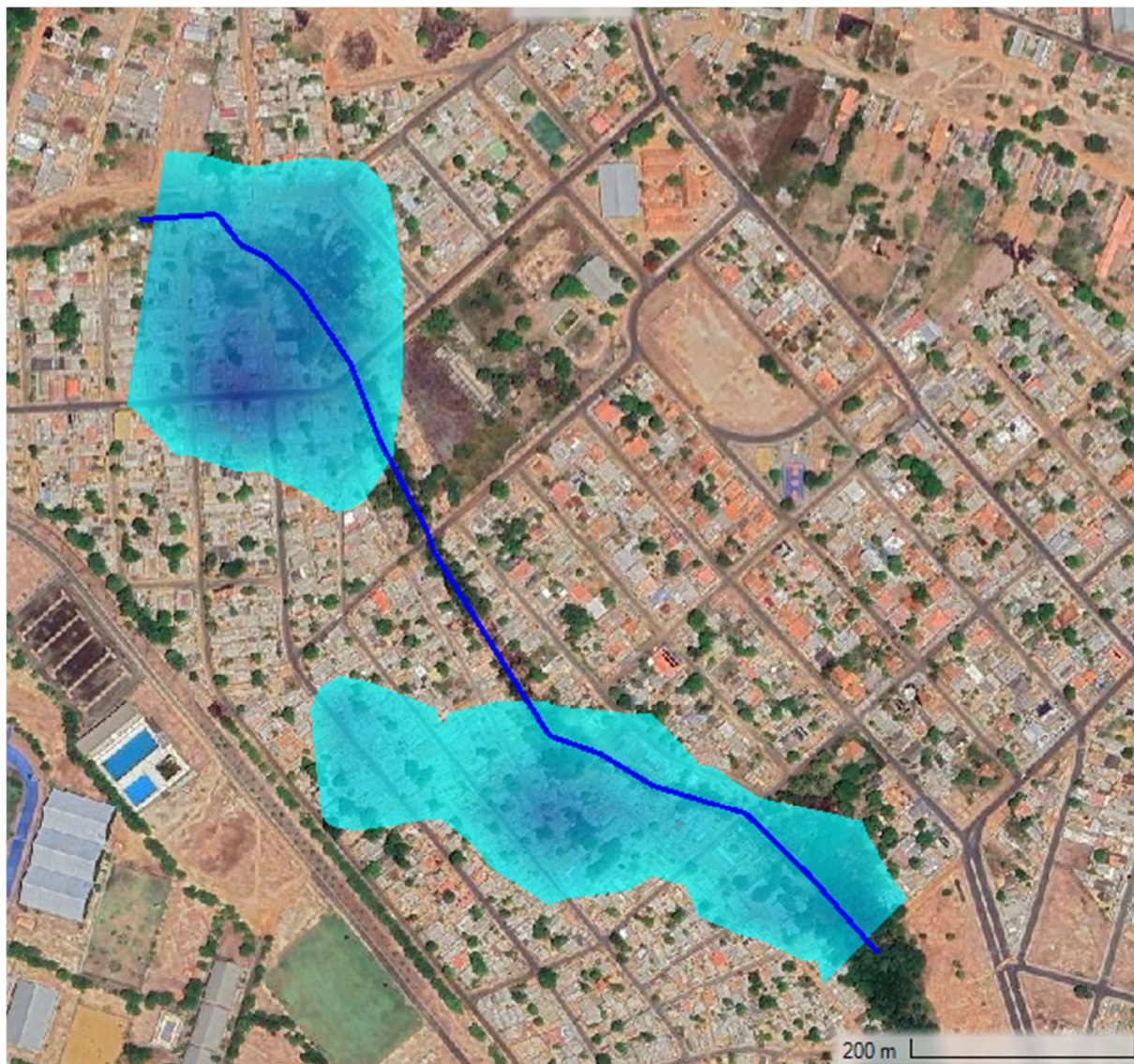
Na imagem observa-se o alcance da inundação para chuvas com Períodos de Retorno de 5 anos, profundidades máximas menores que 1m. Na Figura 24 a simulação para o período de retorno de 10 anos.

Figura 24: Mancha de inundação para o Período de Retorno de 10 anos.



Observa-se o aumento da mancha e a profundidade com vazões maiores, causadas por precipitações de Períodos de Retorno maiores, para 10 anos existe a formação de um ponto onde podem ocorrer inundações próximas de 2 metros. Na Figura 25 é apresentada a inundação para o período de retorno de 20 anos.

Figura 25: Mancha de inundação para chuva com Período de Retorno de 20 anos.



Na Figura 24 podemos observar o alcance da mancha de inundação sobre o mapa da cidade para a chuva de 20 anos de Período de Retorno, é possível observar dois pontos grandes de extravasamento da calha do igarapé, um acima, logo no início à montante do trecho e um abaixo mais a jusante do trecho. É possível observar também a profundidade, maior parte ficando abaixo de 1m e alguns trechos mais escuros representando locais onde a inundação nesse caso pode chegar a 2m.

Sobre a ocorrência de eventos de inundação cada vez mais frequentes na região, observa-se que pode estar havendo aumento da intensidade da vazão, consequência da

impermeabilização do solo na área da bacia. As construções feitas nessa área tornam a infiltração no solo mais difícil e o transporte dessa água então é feito de forma superficial até chegar no igarapé, gerando uma sobrecarga durante a chuva.

Além das alterações causadas no ambiente em que ocupam, as populações humanas e a forma de vida da sociedade atual, tem conduzido à possíveis fenômenos climáticos que tem alterado a forma natural das precipitações. Ocorrências de precipitações extremas podem se tornar mais frequentes e eventos de inundação catastróficos, como o ocorrido no Rio Grande do Sul em 2024, fazem repensar o papel da atuação humana e as formas de mitigação dos riscos potenciais que algumas regiões apresentam.

Por isso o estudo hidrodinâmico é uma ferramenta muito útil na previsão de efeitos catastróficos. Com os dados do relevo e o modelo construído e calibrado para uma determinada região, podem ser feitos testes de precipitações, tantos quantos forem necessários, principalmente em modelos de simulação de grandes proporções, que os testes com modelos de elevação e software de simulação tem se mostrado mais eficientes, como a região do Rio Grande do Sul que foi atingida pela inundação de evento climático sem precedente histórico, e com característica de relevo que possibilitam a ocorrência de inundações.

Todos esses fatores e a presença de famílias residindo nas proximidades, contribuem para que a região seja propensa a ocorrência de frequentes eventos de risco para os moradores, uma situação que tende a piorar com o passar do tempo e a ausência de solução estrutural de drenagem piora as perspectivas, pois o acúmulo de lixo, crescimento de vegetação e impermeabilização do solo são tendência em regiões urbanizadas.

A percepção desses fatores de risco, relacionados ao relevo principalmente, são as contribuições desse trabalho para a análise do problema de inundação estudado, pois a observação dos efeitos causados pelo fluxo de água durante as precipitações, de forma sistemática através do software HEC-RAS, permite uma melhor percepção dos fatos relacionados aos eventos de inundação.

Esse estudo, que utiliza método semelhante ao adotado pela CPRM, utiliza o mapeamento de áreas inundadas como forma de contribuir para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 11. O ODS 11 visa tornar as cidades e os assentamentos humanos mais inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis até 2030. Em 2014, mais da metade da população mundial residia em áreas urbanas, com uma previsão de crescimento para 66% até 2050. Até 2030, é esperado que haja 41 megalópoles com mais de 10 milhões de habitantes. Devido à tendência de concentração da pobreza extrema em áreas sujeitas a inundações e espaços urbanos, as desigualdades sociais são exacerbadas, resultando em violência devido às

disparidades no acesso à cidade. Para alcançar o desenvolvimento sustentável, é essencial realizar mudanças significativas na construção e gestão dos espaços urbanos. Assuntos como mobilidade, gestão de resíduos sólidos e saneamento estão entre as metas do ODS 11, juntamente com o planejamento e fortalecimento da resiliência dos assentamentos humanos, considerando as diversas necessidades das áreas rurais, periurbanas e urbanas. O ODS 11 está alinhado com a Nova Agenda Urbana, acordada durante a III Conferência das Nações Unidas sobre Moradia e Desenvolvimento Urbano Sustentável em outubro de 2016 Germano (2022).

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi possível constatar, através das simulações realizadas, que o relevo nesse trecho do igarapé gera um ponto de estrangulamento que na ocorrência de chuvas intensas contribui para a formação de uma lagoa de acumulação, e em situações mais extremas, produz inundação de até 2m na parte urbanizada localizada no entorno. A jusante existe uma área mais plana e com pontos baixos, também sujeita a inundações, de proporções menores.

Para a situação estudada, relevo e condição de presença de ilhas de floresta, percebeu-se uma melhora significativa na representação do relevo com o modelo de elevação MERIT em comparação com SRTM e Alos Palsar. A eliminação de irregularidades causadas por erros nas áreas de floresta, levou à resultados de simulações que se aproximam mais dos eventos de inundação ocorridos. Por isso é interessante observar em simulações com características semelhantes, se o impacto desses erros altera muito o resultado das simulações.

A utilização direta do modelo de elevação, conforme metodologia utilizada nessa pesquisa, leva a uma análise principalmente das condições do relevo que possibilitam a ocorrência de inundações. Essas observações são possíveis quando se utiliza o software para simular a propagação da água sobre o terreno limpo, ou seja, sem o acréscimo das construções existentes, gerando um panorama geral da atuação do relevo nos eventos de inundação.

Como contribuição para outros trabalhos que utilizem o HEC-RAS ou outro software para simulação, percebeu-se que o levantamento topográfico utilizado em conjunto com o modelo de elevação, além do acréscimo das edificações contribui para aprimorar os estudos. Ao utilizar seções transversais mais detalhadas, pode-se obter melhores resultados, por isso, quanto maior for o detalhamento obtido do terreno, melhores serão os resultados.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO JÚNIOR, A. C. R. **Uso do solo e risco à inundação na cidade de Boa Vista-RR**. Boa Vista: UFRR, 2016.
- BARBOSA, R. I.. Ocupação Humana em Roraima. I. Do Histórico Colonial ao Início do Assentamento Dirigido. Belém: **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**. 1993.
- BARGOS, D. C. **Caracterização de Bacias Hidrográficas**. São Paulo: EEL. 2019.
- BENINI, S. M. **Infraestrutura Verde Aplicada à Drenagem Urbana** São Paulo: ANAP, 2019.
- BRANDS, A. G. Avaliação dos impactos do regime de precipitação atual no sistema de drenagem urbana de Boa Vista – RR. Boa Vista, 2023.
- BRASIL. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE), **Projeção Populacional 2021**, Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>> acesso em: 14 jul. 2022.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Principais tipos de Ameaças Naturais no Brasil segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais CEMADEN**. Disponível em: < <http://www2.cemaden.gov.br/ameacas-naturais-no-brasil/> acesso em: 27 jan 2023.
- BRASILa. **MAPA PARA PREVENÇÃO DE DESASTRES**. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Disponível em: <<http://geoportal.cprm.gov.br/desastres/>> acesso em: 14 jul. 2022.
- BRASILb. **SACE**. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Disponível em: <<https://www.cprm.gov.br/sace/>> acesso em: 14 jul. 2022.
- BRASILc. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais CEMADEN**. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/>> acesso em: 14 jul. 2022.
- BOA VISTA (Roraima). Prefeitura Municipal. **Lei Nº 925 DE 28/11/2006 - Dispõe sobre o parcelamento de solo urbano do município de boa vista e dá outras providências**. Boa Vista: DOM, 2006.

CAMARANO, A. A.; ABRAMOVAY, R. **Êxodo Rural, Envelhecimento e Masculinização no Brasil: Panorama dos Últimos 50 Anos**. Rio de Janeiro: Revista Brasileira De Estudos De População, 1999.

CARVALHO, R. G. de. **Obtenção da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de chuvas intensas para a bacia hidrográfica do igarapé Murupu, Boa Vista-RR**. Boa Vista: UFRR, 2007.

de BARROS, N. C. C. **Paisagens e Tempo na Amazônia Setentrional : Estudo de Ocupação Pioneira na América do Sul**. Recife: UFPE, 1995.

de OLIVEIRA, A. T. R.. **A Migração Venezuelana no Brasil: Crise Humanitária, Desinformação e os Aspectos Normativos**. Brasília: **Revista de Estudos e Pesquisas Sobre as Américas**, 2019.

FALCETTA F. A. M., CORSI A. C. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Validação de mapeamento de inundações urbanas utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS acoplados a dados de cartas topográficas e da SRTM. Florianópolis: 2017.

GERMANO, A. O., MATTIUZI, C. D. P., SILVA, E. D., BINOTTO, R. B., MENDONÇA, R., **Mapeamento de manchas de inundação: Alegrete - RS**. CPRM - Programa Gestão de Riscos e de Desastres. Ação Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos Hidrológicos Críticos. – Porto Alegre: 2022.

GOERL, R.F., KOBAYAMA, M., DOS SANTOS, I. Hidrogeomorfologia: Princípios, Conceitos, Processos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2012

HERZOG, C. P.. **Cidade para Todos**. Rio de Janeiro: MAUAD Editora, 2013.

JAPÃO. **ALOS World 3D (AW3D)**. Disponível em: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d_e.htm> Acesso em: 15 Abr. 2023.

KÖPPEN, W., **Das geographische System der Klimate**. KÖPPEN, W., R. GEIGER (Eds.): **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936.

LHP. **Länderübergreifendes Hochwasser Portal**, Disponível em: <<https://www.hochwasserzentralen.de/>> acesso em: 14 jul. 2022.

CHAI L.T., Wong C. J., James D., Loh H. Y., Liew J. J. F., Wong W. V. C. e Phua M. H. Vertical accuracy comparison of multi-source Digital Elevation Model (DEM) with Airborne

Light Detection and Ranging (LiDAR). Malaysia: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2022.

MONTEIRO, L.R.; KOBİYAMA, M.; ZAMBRANO, F.C. **Mapeamento de Perigo de Inundação**. Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN, 2015.

PAIVA R. C.D., COLLISCHONN W., TUCCI C. E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. Porto Alegre: **Journal of Hydrology**, 2016

PATTON, P.C. Drainage Basin Morphometry and Floods. In: Baker, V., Kochel, R. and Patton, P., Eds., *Flood Geomorphology*, Wiley, New York, 1988.

SANDER C. **Geomorfologia da Planície Aluvial do Alto Rio Branco em Roraima: Dinâmica E Processos Evolutivos**. Maringá: UEM, 2015.

SHAHIRI PARSA, A.; Noori, M. ; HEYDAR, M.; RASHIDI, M. Floodplain Zoning Simulation by Using HEC-RAS and CCHE2D Models in the Sungai Maka River. Malaysia: **Air, Soil and Water Research**, 2016.

Silva, V. D. Sistema de alerta à inundação, utilizando modelo HEC-RAS e técnicas de geoprocessamento para o município de Itajaí – SC. Maringá: UEM, 2017.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília: CEPAL-IPEA, 2012.

ONU. UNDRR - **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030**. Switzerland: UNISDR/GE/2015 - ICLUX EN5000, 2015.

USA. U.S. Army Corps of Engineers, Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/>> acesso em: 20 abr. 2023.

USA. National Aeronautics and Space Administration NASA, disponível em: <<https://www.earthdata.nasa.gov/>> acesso em: 20 dez. 2022.

USA. USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **HEC–RAS River Analysis System – User’s Manual. Version 5.0**: USA: Davis, 2016.

Viewfinder Panoramas. **Jonathan de Ferranti BA Lochmill Farm Newburgh Fife KY14 6EX United Kingdom**. Disponível em: <<http://viewfinderpanoramas.org/>> Acesso em 15 Abr. 2023.

VILELLA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill. 1975.

YAMAZAKI D. **MERIT: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM**, Disponível em:
<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/> acesso em: 13 abr. 2023.

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

E57s Engelhardt, Rafael Castelo Branco.

Simulação de inundação em Boa Vista - RR, uso dos modelos de elevação Alos Palsar, MERIT e software HEC-RAS / Rafael Castelo Branco Engelhardt. – Boa Vista, 2024.
47 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Roraima. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA.

1. Simulação de inundação. 2. HEC-RAS. 3. Modelo de Elevação Alos Palsar e MERIT. I. Título. II. Silva, Adriano Frutuoso da (orientador).

CDU (2. ed.) 528.8(811.4)

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária/Documentalista (UFRR):
Maria de Fátima Andrade Costa - CRB-11/453-AM