



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

José Cláudio Fernandes de Souza Filho

**Delimitação de microbacia de drenagem urbana utilizando modelos digitais de elevação
com variação na resolução espacial**

MOSSORÓ

2024

José Cláudio Fernandes de Souza Filho

**Delimitação de microbacia de drenagem urbana utilizando modelos digitais de elevação
com variação na resolução espacial**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Maria Josicleide Felipe Guedes,
Profª. Dra.

Coorientador: Paulo Cesar Moura da Silva,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

FF481 Filho, José Cláudio Fernandes de Souza.
d Delimitação de microbacia de drenagem urbana
 utilizando modelos digitais de elevação com
 variação na resolução espacial / José Cláudio
 Fernandes de Souza Filho. - 2024.
 98 f. : il.

 Orientadora: Maria Josicleide Felipe Guedes.
 Coorientador: Paulo Cesar Moura da Silva.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

 1. drenagem urbana. 2. delimitação. 3.
reamostragem. 4. resolução. 5. exatidão. I. Felipe
Guedes, Maria Josicleide, orient. II. Moura da
Silva, Paulo Cesar, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

José Cláudio Fernandes de Souza Filho

**Delimitação de microbacia de drenagem urbana utilizando modelos digitais de elevação
com variação na resolução espacial**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 18/abril/2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARIA JOSICLEIDE FELIPE GUEDES**
Data: 25/04/2024 19:22:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Josicleide Felipe Guedes, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente - Orientadora

**PAULO CESAR MOURA
DA SILVA**

Assinado digitalmente por PAULO CESAR MOURA DA SILVA:
DN: CN=PAULO CESAR MOURA DA SILVA,
- Universidade Federal Rural Do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2024.04.25 18:06:00-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.0.0

Paulo Cesar Moura da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO TAYGRA VASCONCELOS FERNANDES**
Data: 25/04/2024 19:34:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **DANIELA DE FREITAS LIMA**
Data: 26/04/2024 01:19:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniela de Freitas Lima, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinadora

AGRADECIMENTOS

A conquista desse sonho não é resultado apenas de uma pessoa, mas envolve o esforço e os sentimentos de muitas outras, direta ou indiretamente. A eles quero compartilhar os meus agradecimentos ao celebrar a conclusão dessa etapa da minha vida. Então, deixo registrado nessas palavras os meus agradecimentos que irão superar o tempo.

À minha família, que sempre cuidou de mim durante essa trajetória: minha avó Dona Raimunda, meu avô Dedé, minha mãe Edineide, meu pai Zé Cláudio e meus irmãos Brenno, Helouise e Gabriela.

À minha segunda família de Mossoró, pelo acolhimento e suporte: Aécio, Calíope, Clarissa, Marcos, Nadja, Norma e Pedro Vinícius. Especialmente ao Gabriel, pelo apoio diário.

Aos meus orientadores Josicleide e Paulo César, que não só aceitaram o desafio, mas também acreditaram no meu potencial e me inspiraram a alcançar o melhor de mim em cada passo.

À banca examinadora, composta pela professora Daniela e pelo professor Rogério, que complementaram significativamente esse trabalho com suas ideias.

E, por fim, aos meus amigos Daniel, Erick, Humberto, Mariana, Melissa, Rafael e Victor, por proporcionarem momentos de alegria diante dos desafios encontrados ao longo da minha trajetória acadêmica de graduação.

Obrigado a todos!

RESUMO

A delimitação de microbacias de drenagem urbana emerge como uma etapa essencial para a tomada de decisão no planejamento das cidades. Diante disso, a automatização do processo de delimitação de microbacias de drenagem urbana de forma computadorizada e a validação destes métodos utilizando-se modelos estatísticos, aliada à tecnologia de baixo custo, facilita oportunidades para uma aplicação mais ampla desses métodos avançados em contextos urbanos diversos. Nesse contexto, o objetivo principal desta pesquisa foi realizar uma comparação morfométrica da delimitação de microbacia de drenagem urbana a partir de modelos digitais de elevação (MDE) com diferentes resoluções espaciais (30, 12,5 e 1 metro). O MDE com resolução espacial de 1 metro foi obtido a partir de uma reamostragem de dados de uma imagem com baixa resolução espacial (SRTM - 90 metros). A partir dos três modelos obtidos para uma área no município de Mossoró-RN, que engloba o bairro Dom Jaime Câmara, foi realizado o procedimento para delimitar a área da microbacia pelo *software* QGIS 3.34. A análise das delimitações geradas pelos diversos modelos digitais de elevação revelou, nos resultados da pesquisa, uma variação entre baixa e moderada nos parâmetros morfométricos examinados. Destaca-se ainda, nos resultados, que o modelo com resolução espacial de 12,5 metros demonstrou a maior exatidão em representar a área de estudo, pela comparação entre os dados altimétricos obtidos em campo. Portanto, concluiu-se que a variação na resolução espacial influenciou de forma pouco significativa na delimitação da microbacia de estudo, consequentemente nos parâmetros morfométricos utilizados para análise da área. Concluiu-se também que a reamostragem para a produção de um modelo com alta resolução não substitui o MDE com maior resolução espacial disponível (12,5 metros), mas que é útil quando o propósito for obter a delimitação de uma microbacia de drenagem urbana que seja mais suave e que ocupe um menor espaço de armazenamento computacional que outras delimitações feitas a partir de modelos com menores resoluções, como de 90 e 30 metros.

Palavras-chave: drenagem urbana; delimitação; reamostragem; resolução; exatidão.

ABSTRACT

The delimitation of urban drainage micro-watersheds emerges as an essential step in decision-making for city planning. In light of this, the automation of the urban drainage micro-watershed delimitation process through computerization and the validation of these methods using statistical models, coupled with low-cost technology, facilitate opportunities for a broader application of these advanced methods in diverse urban contexts. Within this context, the main objective of this research was to conduct a morphometric comparison of urban drainage micro-watershed delimitation using digital elevation models (DEM) with different spatial resolutions (30, 12.5, and 1 meter). The DEM with a spatial resolution of 1 meter was obtained through resampling data from an image with low spatial resolution (SRTM - 90 meters). Using the three models obtained for an area in the municipality of Mossoró-RN, which encompasses the Dom Jaime Câmara neighborhood, the procedure for delimiting the micro-watershed area was carried out using QGIS 3.34 software. The analysis of the delimitations generated by the various digital elevation models revealed, in the research results, a variation ranging from low to moderate in the examined morphometric parameters. It is noteworthy, in the results, that the model with a spatial resolution of 12.5 meters demonstrated the highest accuracy in representing the study area, as compared to altimetric data obtained in the field. Therefore, it was concluded that the variation in spatial resolution had a little significant influence on the delimitation of the study micro-watershed, consequently affecting the morphometric parameters used for area analysis. It was also concluded that resampling for the production of a high-resolution model does not replace the DEM with higher available spatial resolution (12.5 meters), but it is useful when the purpose is to obtain the delimitation of an urban drainage micro-watershed that is smoother and occupies less computational storage space than other delimitations made from models with lower resolutions, such as 90 and 30 meters.

Keywords: urban drainage; delineation; resampling; resolution; accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Terra Brasilis: a primeira representação cartográfica integrada do Brasil.....	19
Figura 2 - Ilustração de bacias hidrográficas.....	23
Figura 3 - Estrutura de um aquífero assinalando as diferentes camadas geológicas.....	25
Figura 4 - Modelo digital de elevação.....	28
Figura 5 - Modelo digital de superfície e modelo digital de terreno.....	30
Figura 6 - Delimitação do semiárido nordestino atualizada no ano de 2021.....	32
Figura 7 - Mapa das bacias urbanas de esgotamento sanitário.....	33
Figura 8 - Delimitação espacial da Bacia de esgotamento sanitário no Bairro Dom Jaime Câmara para o plano Municipal de Saneamento Básico de Mossoró - RN.....	34
Figura 9 - Canal passando com disposição para resíduos entre as residências do bairro Dom Jaime Câmara, em Mossoró - RN.....	35
Figura 10 - Vista do canal do bairro Dom Jaime Câmara no município de Mossoró - RN.....	35
Figura 11 - Fluxograma metodológico geral da pesquisa.....	38
Figura 12 - Fluxograma de obtenção do modelo digital com resolução espacial de 1 metro (reamostrado).....	40
Figura 13 - Vista do site GPS Visualizer na aba "Elevation".....	42
Figura 14 - Demonstração de uma superfície produzida pelo algoritmo "Interpolação TIN" a partir de pontos altimétricos.....	42
Figura 15 - Vista da tela de execução do algoritmo "Interpolação TIN" no software QGIS, com os parâmetros de entrada selecionados para a produção do modelo digital de elevação de 1 metro (reamostrado).....	43
Figura 16 - Base RTK instalada, antes do início do levantamento altimétrico.....	45
Figura 17 - Representação no software QGIS 3.34 dos pontos coletados (em azul) a partir do levantamento sob o bairro Dom Jaime Câmara.....	46
Figura 18 - Fluxograma do procedimento metodológico para a delimitação da microbacia de drenagem urbana nesta pesquisa.....	48
Figura 19 – Vista em perfil de um sink e um peak.....	49
Figura 20 - Vista da tela de execução do algoritmo "r.watershed" no software QGIS, com os parâmetros de entrada selecionados para a produção das camadas de direção de drenagem e	

segmento de fluxo.....	50
Figura 21 - Ponto de exutório na microbacia de estudo, escolhido a partir do segmento de fluxo gerado pelo modelo digital de elevação de 30 m.....	51
Figura 22 - Em vermelho bordas suavizadas pelo algoritmo "r.water.outlet" e em verde bordas ásperas, no QGIS.....	52
Figura 23 - Mapa de localização da área de estudo após as delimitações realizadas,.....	62
Mossoró - RN.....	62
Figura 24 - Mapa de localização da microbacia delimitada neste estudo, localizada em Mossoró - RN, com modelo digital de elevação com resolução espacial de 30 metros.....	63
Figura 25 - Mapa de localização da microbacia delimitada neste estudo, localizada em Mossoró - RN, com modelo digital de elevação com resolução espacial de 12,5 metros.....	64
Figura 26 - Mapa de localização da microbacia delimitada neste estudo, localizada em Mossoró - RN, com modelo digital de elevação com resolução espacial de 1 metro (reamostrado).....	65
Figura 27 - Comparação por sobreposição dos limites da microbacia de drenagem urbana delimitada neste estudo, a partir de modelos digitais de elevação de diferentes resoluções....	66
Figura 28 - Perfil de elevação do curso d'água principal para a resolução espacial de 30 metros do modelo digital de elevação para a microbacia estudada.....	75
Figura 29 - Perfil de elevação do curso d'água principal para a resolução espacial de 12,5 metros do modelo digital de elevação para a microbacia estudada.....	75
Figura 30 - Perfil de elevação do curso d'água principal para a resolução espacial de 1 metro (reamostrado) do modelo digital de elevação para a microbacia estudada.....	75
Figura 31 - Mapas de declividade das delimitações da microbacia estudada nesta pesquisa com resoluções de 30; 12,5 e 1 metro (reamostrado), respectivamente.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características geométricas de bacias hidrográficas, fórmulas, legenda e comentário.....	55
Quadro 2 - Características do relevo de bacias hidrográficas, fórmulas, legenda e comentário... 57	
Quadro 3 - Características do relevo de bacias hidrográficas, fórmulas, legenda e comentário... 59	
Quadro 4 - Valores do coeficiente de deflúvio (C) adotados pela Prefeitura São Paulo.....	61
Quadro 5 - Valores do do coeficiente de deflúvio (C) para áreas rurais.....	61
Quadro 6 - Interpretação do coeficiente de compacidade (Kc).....	71
Quadro 7 - Interpretação do fator de forma ou coeficiente de forma.....	72
Quadro 9 - Classes para a densidade de drenagem.....	81
Quadro 10 - Classificação da densidade hidrográfica (Dh) de bacias.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das somas das diferenças para as altitudes apresentadas no Apêndice A..	
67	
Tabela 2 - Comparação das características morfométricas da microbacia em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE).....	69
Tabela 3 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às configurações geométricas em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa.....	71
Tabela 4 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às altitudes máximas e mínimas em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa.....	74
Tabela 5 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às declividades e texturas topográficas em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada.....	76
Tabela 6 - Declividade da microbacia estudada nesta pesquisa em três modelos digitais de elevação (MDE) com resoluções espaciais diferentes, a partir do mapa de declividade produzido no software QGIS 3.34.....	79
Tabela 7 - Classes de textura topográfica.....	80
Tabela 8 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às densidades hidrográficas e de drenagem em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa.....	80
Tabela 9 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos ao tempo de concentração em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa.....	82
Tabela 10 - Estimativa da intensidade da chuva máxima para a microbacia estudada nesta pesquisa, considerando diversos tempo de retorno associados e variando a resolução espacial dos modelos digitais de elevação (MDE).....	84
Tabela 11 - Estimativa da vazão máxima para a microbacia estudada nesta pesquisa, considerando diversos tempo de retorno associados e variando a resolução espacial dos modelos digitais de elevação (MDE).....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ΔH	Amplitude altimétrica do curso d'água principal
Amáx	Altitude máxima do curso d'água principal
Améd	Altitude média do curso d'água principal
Amín	Altitude mínima do curso d'água principal
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Ar	Área não-urbanizada
At	Área total de drenagem
Au	Área urbanizada
Bel	Bacharel
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
Cp	Comprimento do curso d'água principal
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
Ct	Comprimento total dos cursos d'água
CV	Coefficiente de variação
Dd	Densidade de drenagem
Dh	Densidade hidrográfica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Dr	Doutor
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EROS	Earth Resources Observation and Science
ESDS	Earth Science Data System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
HU	Hidrograma Unitário
i	Intensidade da chuva
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Ic	Índice de circularidade
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
Kc	Coefficiente de compacidade
Kf	Fator de forma
KML	Keyhole Markup Language
FGV	Fundação Getúlio Vargas
MDE	Modelos Digitais de Elevação
MDS	Modelo digital de superfície
MDT	Modelo digital de terreno

NASA	National Aeronautics and Space Administration
P	Perímetro total
PA	Pará
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
Q	Vazão escoada total atual
Rea	Razão de alongação
RN	Rio Grande do Norte
RTK	Real-Time Kinematic
S	Declividade do curso d'água principal
SAGA	Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado
SAGRE	Sistema Automatizado de Gerência da Rede Externa
SHP	Formato shapefile
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SITIM	Sistema de Tratamento de Imagens
SPRING	Sistema para Processamento de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
tc	Tempo de concentração
TIN	Malha Irregular Triangulada
Tt	Textura topográfica
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1 Evolução da cartografia e surgimento dos sistemas de informação geográfica.....	19
3.2 Surgimento do estudo das bacias hidrológicas.....	22
3.3 A Importância da delimitação das bacias hidrográficas.....	23
3.3.1 Gestão de recursos hídricos.....	23
3.3.2 Prevenção de desastres naturais.....	25
3.3.3 Conservação ambiental.....	26
3.3.4 Monitoramento da qualidade da água.....	26
3.3 Técnicas para delimitar uma bacia hidrográfica.....	27
3.4 Delimitação de microbacias e sua importância para o planejamento da drenagem urbana.....	28
3.5 Desafios na delimitação de microbacias hidrográficas: tecnologia.....	29
3.6 Modelos digitais de superfície e de terreno: uma análise comparativa para aplicações em geociências.....	30
4 MATERIAIS E MÉTODO.....	32
4.1 Localização da área de estudo.....	32
4.2 Materiais utilizados e etapas metodológicas.....	36
4.2.1 Obtenção dos dados de entrada.....	38
4.2.2 Produção do MDE com resolução espacial de 1 metro (reamostrado).....	39
4.2.3 Pontos de controle.....	44
4.2.4 Delimitação da microbacia a partir do MDE nas diferentes resoluções espaciais.....	47
4.2.5 Parâmetros morfométricos da microbacia delimitada.....	53
4.2.5.1 Características geométricas.....	54
4.2.5.2 Características do relevo.....	56

4.3.5.3 Características da rede de drenagem.....	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
5.1 Delimitação da microbacia de drenagem urbana.....	62
5.2 Pontos de controle.....	67
5.3 Características morfométricas da microbacia de estudo.....	68
5.3.1 Área, perímetro e comprimento máximo a partir do exutório.....	70
5.3.2 Configurações geométricas.....	70
5.3.3 Altitude máxima, mínima, média e amplitude altimétrica.....	74
5.3.4 Declividade, mapas de declividade e textura topográfica.....	76
5.3.5 Densidade de drenagem e densidade hidrográfica.....	80
5.3.6 Tempo de concentração.....	82
5.3.7 Intensidade da chuva.....	83
5.3.8 Vazão total.....	84
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A – ALTITUDES OBTIDAS DOS PONTOS COLETADOS EM CAMPO E EXTRAÍDOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS NESTA PESQUISA.....	97

1 INTRODUÇÃO

Seja realizado por meio de levantamento topográfico computadorizado ou tradicional, o processo de delimitação e compreensão de bacias emerge como uma etapa essencial para tomadas de decisões de planejamento urbano (Oliveira, 2016).

Devido ao crescimento e desenvolvimento populacional e urbano, o município de Mossoró - RN, onde está localizada a área amostral deste estudo, encontra desafios específicos em sua estrutura de drenagem urbana, ressaltando-se a necessidade iminente da atualização do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), além da elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana, dentre outros planos estratégicos para o saneamento básico no município.

Esses desafios, além de estarem vinculados com questões sociopolíticas, como a falta de medidas públicas de controle para o crescimento urbano desordenado (Guimarães, 2019), também estão relacionados com a utilização, ao longo do tempo, de equipamentos de topografia tradicionais que podem ter limitado a realização de levantamentos topográficos detalhados da região, dificultando ainda mais a expansão planejada da cidade.

Diante desses desafios, o uso desses métodos tradicionais para delimitação de bacias/microbacias e o custo envolvido na produção de novos modelos digitais de elevação com alta resolução espacial, que frequentemente demandam a utilização de programas espaciais, como satélites e radares, pode prejudicar a eficácia e a eficiência dos projetos de drenagem urbana em diversos aspectos, como a baixa precisão no detalhamento para mapear detalhadamente as características das microbacias urbanas, levando a uma compreensão inadequada da topografia.

Por isso, a automatização do processo de delimitação de microbacias de drenagem urbana de forma computadorizada e a validação destes métodos utilizando-se modelos estatísticos, aliada à tecnologia de baixo custo, facilita oportunidades para uma aplicação mais ampla desses métodos avançados em contextos urbanos diversos e facilita o planejamento da expansão urbana; "além de estabelecer a padronização do traçado e posterior minimização de conflitos quanto à fixação da unidade elementar de gestão dos recursos hídricos" (Sobrinho, 2010, p. 54).

Nesse contexto, torna-se importante obter validação para a aplicação de métodos computadorizados na delimitação de microbacias urbanas. Essa validação visa realizar um levantamento rápido e economicamente viável, buscando identificar soluções de manejo e

drenagem de águas pluviais mais eficientes para o ambiente urbano tanto de Mossoró - RN, onde a área amostral do estudo está situada, bem como de outras cidades.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar comparação morfométrica da delimitação de microbacia de drenagem urbana a partir de modelos digitais de elevação com diferentes resoluções espaciais.

2.2 Objetivos específicos

- Sistematizar método replicável para a produção, por reamostragem, de modelo digital de elevação com alta resolução espacial que seja compatível com as necessidades para delimitação de microbacias de drenagem urbana;
- Comparar os dados altimétricos dos modelos digitais de elevação utilizados nesta pesquisa com pontos de controle de alta precisão coletados em campo;
- Definir o modelo que representa com maior exatidão a microbacia estudada.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Evolução da cartografia e surgimento dos sistemas de informação geográfica

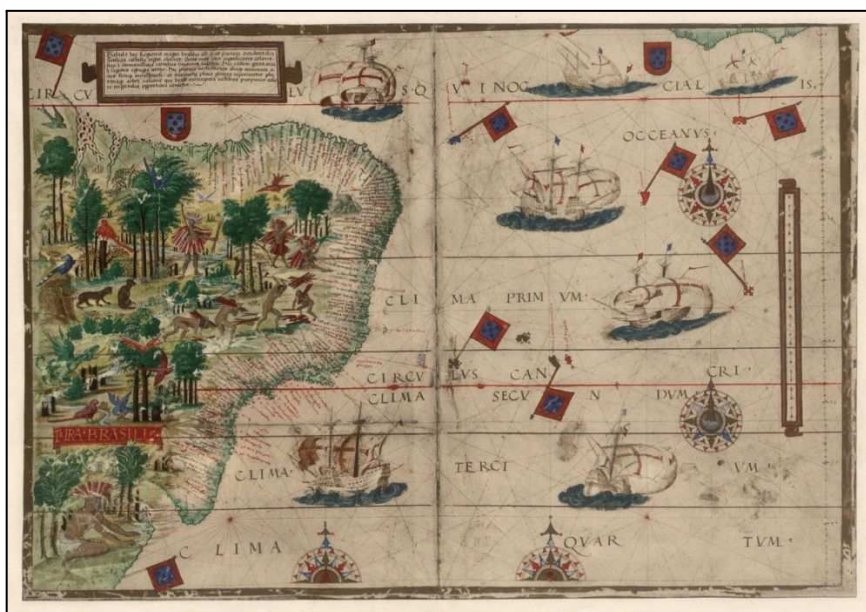
Sobre a longa tradição da análise geoespacial na compreensão do espaço terrestre, em seu estudo sobre sistemas de informação geográfica e sua evolução histórica, Bolfe (2008) comenta que:

A necessidade de identificar diferentes "camadas" de dados em uma série de mapas e tentar analisá-las e relacioná-las por sobreposição é uma ideia muito mais remota do que a existência dos atuais sistemas de informação geográfica (Bolfe, 2008, p. 2).

Inicialmente, por meio de abordagens analógicas, ou seja, utilizando métodos tradicionais e materiais físicos para criar mapas e representações cartográficas (como desenho, pintura ou gravura em papel ou pergaminho), cartógrafos e geógrafos têm empregado essas técnicas para compreender a complexidade dos territórios explorados, para permitir a visualização e interpretação de padrões espaciais e tendências ao longo da história.

Por exemplo, a primeira representação cartográfica integrada do território brasileiro, intitulada "Terra Brasilis" (Figura 1), atribuída aos cartógrafos Lopo Homem, Pedro e Jorge Reinel, é datado do ano de 1519.

Figura 1 - Terra Brasilis: a primeira representação cartográfica integrada do Brasil



Fonte: Banco Nacional Digital (2024).

Esse mapa é reconhecido por retratar o comércio do pau-brasil no século XVI, sendo identificado como o primeiro mapa econômico do Brasil e uma das primeiras representações visuais do desmatamento no país (Faria, 2006).

Evidencia-se, assim, a necessidade de simplificar a representação do espaço geográfico para facilitar a interpretação e a tomada de decisão. Nesse contexto, a utilização do mapeamento de dados, conforme destaca Sebusiani (2011), emerge como uma prática valiosa para destacar de maneira mais clara os padrões de utilização e ocupação dos espaços e, ainda segundo a autora, a complexidade das questões ambientais dificulta a visualização e a interpretação das interações dos atores sociais com a natureza. Por conseguinte, cada localidade apresenta suas peculiaridades, reforçando a importância das representações cartográficas na visualização e interpretação dos aspectos necessários ao planejamento ambiental (Sebusiani, 2011. p. 258).

Ao destacar esses padrões de maneira clara, o mapeamento de dados facilita a compreensão do panorama geral do ambiente estudado, contribuindo assim para uma gestão mais eficaz e informada do espaço geográfico.

Além disso, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) define cartografia como a representação plana, simplificada e convencional da superfície terrestre, apresentada por meio de mapas, cartas ou plantas. Logo, a cartografia possibilita a representação espacial de diversos levantamentos, abrangendo aspectos ambientais, mas também socioeconômicos, educacionais, de saúde, entre outros.

Segundo Costa (2008), a cartografia analógica evoluiu para o formato digital a partir do advento da computação gráfica, e afirma que:

Com os sistemas CAD (Computer Aided Design), o processo de elaboração, atualização e reprodução cartográfica torna-se, muito mais rápido. A cartografia digital viabilizou e impulsionou o surgimento da tecnologia de sistemas de informação geográfica que evoluiu de maneira muito rápida a partir da década de 1970 (Costa, 2008, p. 60).

Bolfe (2008) ressalta que foi durante o início da década de 60 que surgiram numerosos grupos acadêmicos, impulsionados pela evolução dos sistemas computacionais, com o propósito de conduzir estudos voltados para a criação de programas automatizados, incorporando-os dentro de um conceito de sistema de informação geográfica (SIG).

Também, quanto ao surgimento dos SIG no Brasil, Bolfe (2008) discorre que:

As primeiras aplicações de SIG no Brasil iniciaram-se a partir do esforço de divulgação e formação de pessoal realizado pelo professor Jorge Xavier da Silva, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, no início dos anos 80. A vinda do Dr. Roger Tomlinson ao Brasil, em 1982, responsável pela criação do primeiro SIG (Canadian Geographical Information System), fortaleceu alguns grupos já existentes e incentivou o aparecimento de vários outros grupos interessados em desenvolver essa tecnologia (Bolfe, 2008, p. 82).

Sebusiani (2011) apresenta os primeiros esforços empreendidos no Brasil no campo dos SIG durante a década de 80:

Alguns variados programas foram então aqui desenvolvidos como, por exemplo, o Sistema de Análise Geo-Ambiental (SAGA), criado na UFRJ; o Sistema Automatizado de Gerência da Rede Externa (SAGRE) produzido pelo CPqD em conjunto com a Telebrás e por fim as criações do INPE como o Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM) e o Sistema para Processamento de Informações Geográficas (SPRING) (Sebusiani, 2011, p. 259).

E enfatiza que, para uma elaboração integrada dos projetos e a obtenção de dados mais precisos e rápidos, a solução encontrada foi utilizar sistemas computacionais capazes de organizar as informações previamente georreferenciadas em bancos de dados (Sebusiani, 2011). Para a autora, foi deste modo que o geoprocessamento integrou o estudo da cartografia, através do armazenamento e análise de dados por meio de programas de computador em um SIG.

Segundo Souza (1996), o uso de um SIG possibilita, por exemplo, a elaboração de um diagnóstico socioambiental de uma área específica de estudo, por meio da criação e monitoramento de um banco de dados.

Ademais, sobre o comentário de Souza (1996), Sebusiani (2011) conclui:

Mais que isso [sobre a utilização do SIG para a elaboração de um diagnóstico socioambiental], o uso integrado de planos de informações permite que esse diagnóstico seja preparado de forma que as interações entre temas sejam claras e construtivas. Entenda-se aqui temas como cada característica da área a ser analisada, como por exemplo: tipo de solo, clima, corpos hídricos, vegetação e ocupação, dentre outras (Sebusiani, 2011, p. 259).

Uma das principais fontes de dados para SIG é o sensoriamento remoto. Segundo Novo (1998), o sensoriamento remoto é uma abordagem que possibilita a obtenção de dados e informações de uma área específica na superfície terrestre, sem a necessidade de contato direto. Essa técnica é realizada através da utilização de sensores instalados em aeronaves, drones e satélites artificiais, os quais capturam imagens da superfície terrestre.

Logo, utilizando sensoriamento remoto, é possível capturar uma ampla gama de informações sobre a superfície terrestre, incluindo imagens de alta resolução espacial, dados de infravermelho e radar. Esses dados, por exemplo, são essenciais para o monitoramento de recursos naturais, como florestas e rios, e para a detecção de desastres ambientais, como enchentes e deslizamentos de terra (Mascarenha, 2009).

Outra forma importante de obtenção de dados é o levantamento em campo. Isso envolve a coleta manual de informações diretamente no local de interesse, utilizando técnicas como medições de GPS, entrevistas com residentes locais e observações ambientais. Em uma análise comparativa dos métodos de obtenção de dados, Francisco (2017) observou que os levantamentos remotos permitem a coleta de dados em áreas extensas e de difícil acesso, enquanto os levantamentos de campo têm a vantagem de oferecer um nível mais detalhado de informações.

No Brasil, há exemplos de diversos bancos de dados geoespaciais, tais como: Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), Agência Nacional das Águas (ANA), Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), dentre outros.

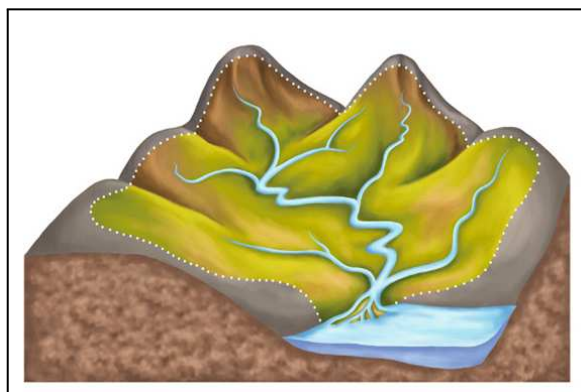
3.2 Surgimento do estudo das bacias hidrológicas

De acordo com Schiel et al. (2003) o estudo das bacias hidrológicas é uma área fundamental da hidrologia, ciência que se dedica ao estudo da água na Terra, incluindo sua distribuição, movimentação e qualidade. As bacias hidrológicas são áreas da superfície terrestre drenadas por um rio principal e seus afluentes, formando um sistema hidrográfico completo. A importância dessas bacias está na regulação do fluxo de água, na recarga de aquíferos, na manutenção da biodiversidade e no fornecimento de água para diversos usos, como consumo humano, agricultura e indústria (Schiavetti; Camargo, 2002).

Ademais, Rosa (2017) cita que o interesse científico nas bacias hidrológicas aumentou significativamente com o surgimento da revolução industrial, quando a urbanização e a industrialização começaram a impactar os recursos hídricos de forma mais intensa. A necessidade de compreender e gerenciar os recursos hídricos levou ao desenvolvimento de técnicas e métodos para medir e analisar a quantidade e a qualidade da água em uma bacia hidrográfica.

No século XX, avanços tecnológicos, como o uso de satélites e computadores, impulsionaram ainda mais o estudo das bacias hidrográficas. Para Garcia (2016) os cientistas do século XXI já são capazes de modelar o comportamento das bacias hidrográficas com precisão, prevendo enchentes, secas e impactos ambientais com maior eficácia. A Figura 2 apresenta a ilustração espacial de um sistema de bacias hidrográficas.

Figura 2 - Ilustração de bacias hidrográficas



Fonte: Matias (2024).

3.3 A Importância da delimitação das bacias hidrográficas

3.3.1 Gestão de recursos hídricos

Segundo Carvalho (2020) a gestão de recursos hídricos é essencial para garantir o uso sustentável e equitativo da água, um recurso natural fundamental para a vida e para o desenvolvimento humano. Uma das ferramentas mais importantes para a gestão eficaz dos recursos hídricos é a delimitação das bacias hidrográficas, que são as áreas drenadas por um sistema de rios e seus afluentes.

Outrossim, Netto (2022) menciona que ao delimitar uma bacia hidrográfica, é possível identificar a área de captação de água de um curso d'água específico. Isso facilita a gestão e o planejamento dos recursos hídricos, permitindo a implementação de medidas adequadas para garantir a disponibilidade de água para diversos usos, como abastecimento público, irrigação agrícola, produção de energia hidrelétrica, navegação e recreação.

Segundo Álvares (2012), no caso do abastecimento público, por exemplo, a delimitação da bacia hidrográfica de um manancial de água permite identificar as áreas que devem ser protegidas para evitar a contaminação da água por atividades humanas, como agricultura intensiva, mineração e urbanização desordenada. Além disso, para o autor, a delimitação da bacia hidrográfica também facilita o monitoramento da qualidade da água e a implementação de medidas de conservação e recuperação ambiental.

Ao trazer os ideais de Farias et al. (2021):

[...] a água não é como os demais recursos naturais do Planeta, nem somente uma matéria-prima, mas um bem ambiental que pode ser valorizado como um bem econômico. É a única matéria-prima ambiental cuja utilização tem um efeito de retorno sobre o manancial utilizado. Portanto, o conjunto das águas de forma geral, de chuva, dos rios, as águas subterrâneas e as águas de reúso não potável, nas indústrias e na agricultura, deve ser considerado como bem valorado, em função de sua utilidade, benefícios, disponibilidade e acesso com qualidade (Farias et al. 2021, p. 112).

Assim, Farias (2021) ressalta a importância da água como um recurso natural único e fundamental para a vida no planeta. Ao contrário de outros recursos naturais, a água não é apenas uma matéria-prima, mas um bem ambiental que pode ser valorizado como um bem econômico devido ao efeito de seu retorno sobre o manancial utilizado.

Logo, Setti e Freitas (2001) abordam que no contexto da irrigação agrícola, a delimitação da bacia hidrográfica permite identificar as áreas que podem ser irrigadas de forma sustentável, levando em consideração a disponibilidade de água e as necessidades das culturas. Isso é importante para garantir a segurança alimentar e o desenvolvimento da agricultura, sem comprometer a disponibilidade de água para outros usos e para os ecossistemas aquáticos (Leal; Guimarães, 2001).

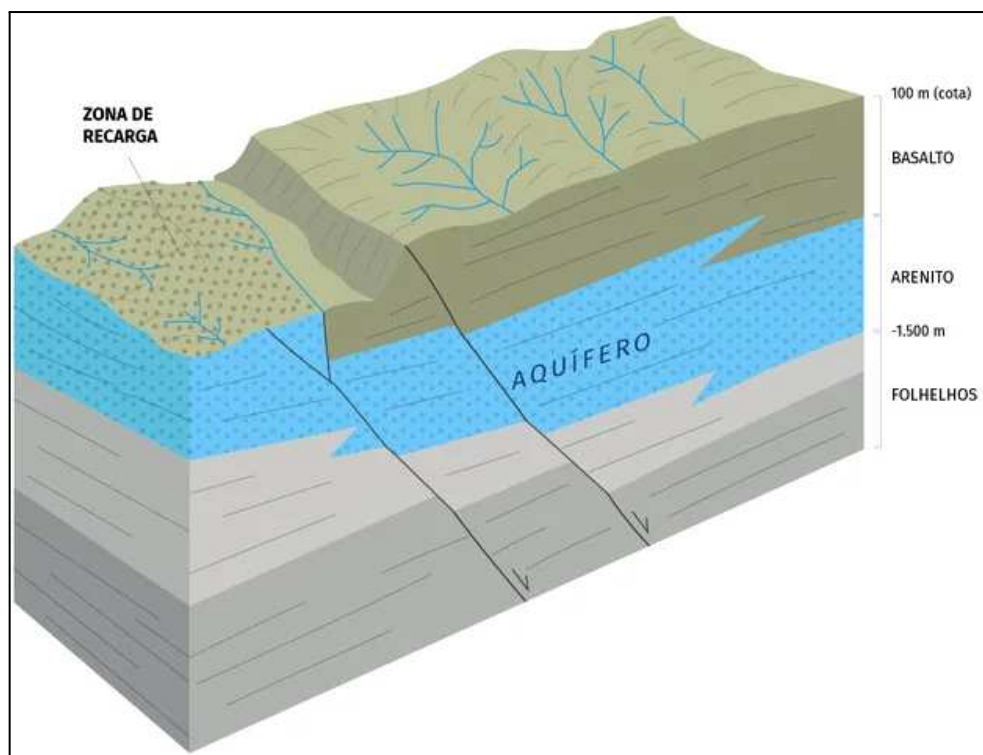
Para a produção de energia hidrelétrica, a delimitação da bacia hidrográfica é fundamental para identificar o potencial de geração de energia de um determinado rio e para planejar a construção de usinas hidrelétricas de forma sustentável, levando em consideração os impactos ambientais e sociais.

3.3.2 Prevenção de desastres naturais

Silva et al. (2020) explicam que a delimitação de bacias hidrográficas desempenha um papel crucial na prevenção de desastres naturais, especialmente em áreas propensas a inundações, deslizamentos de terra e outros eventos relacionados à água. Ao identificar e mapear as bacias hidrográficas, é possível entender melhor a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, assim como a distribuição de solos e vegetação, fatores-chave na ocorrência desses desastres (Kobiyama et al., 2006).

Diante disso, Tominaga (2009) reflete que as zonas de recarga de aquíferos (Figura 3) e de maior acumulação de água, por exemplo, podem ser identificadas e monitoradas mais eficazmente com a delimitação das bacias hidrográficas. Isso é crucial para prever inundações e implementar medidas de mitigação, como a construção de diques, canais de drenagem e áreas de retenção de água.

Figura 3 - Estrutura de um aquífero assinalando as diferentes camadas geológicas



Fonte: Bezerra (2024).

Ademais, a delimitação das bacias hidrográficas ajuda a identificar áreas propensas a deslizamentos de terra, especialmente em terrenos íngremes e com solos saturados (Sulaiman, 2016). Com essa informação, Sulaiman (2016) conclui que é possível implementar medidas preventivas, como a estabilização de encostas, o reflorestamento e o controle do uso do solo nessas áreas .

3.3.3 Conservação ambiental

Carvalho (2020) estudam que a delimitação das bacias hidrográficas é essencial para a conservação ambiental, pois permite identificar e mapear áreas de preservação, como matas ciliares e áreas úmidas, que desempenham um papel fundamental na manutenção da biodiversidade e na regulação do ciclo hidrológico.

Santos et al. (2019) analisam que as matas ciliares, por exemplo, são áreas de vegetação nativa que cercam os cursos d'água e desempenham várias funções importantes, como a proteção das margens contra erosão, a filtragem de poluentes e sedimentos, a manutenção da qualidade da água e a provisão de *habitat* e corredores ecológicos para a fauna local.

Também, elas permitem identificar essas áreas e implementar medidas de proteção e recuperação, garantindo a conservação desses ecossistemas tão importantes para a biodiversidade e para o equilíbrio dos sistemas aquáticos (Américo-Pinheiro, 2018).

Da mesma forma, Diogo (2013) finaliza que as áreas úmidas, como pântanos e manguezais, desempenham um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico, atuando como reservatórios naturais de água e ajudando a controlar inundações e secas. Ademais, são *habitats* importantes para diversas espécies de plantas e animais, contribuindo para a manutenção da biodiversidade. A delimitação das bacias hidrográficas permite identificar e proteger essas áreas, garantindo sua preservação e os serviços ecossistêmicos que fornecem.

3.3.4 Monitoramento da qualidade da água

Sobre essa temática, Figueiredo et al. (2008) menciona que a delimitação das bacias facilita o monitoramento da qualidade da água, pois permite uma abordagem mais integrada e específica para cada área. As atividades humanas, como a agricultura, a indústria e o desenvolvimento urbano, podem ter um impacto significativo na qualidade da água de um rio ou lago dentro de uma bacia hidrográfica.

Ao delimitar as bacias hidrográficas, é possível identificar as fontes potenciais de poluição e os principais fatores que afetam a qualidade da água em cada área. Isso permite a implementação de programas de monitoramento mais eficazes, focados nas áreas mais críticas e nas atividades que mais contribuem para a degradação da água (Umeki et al. 2020).

Além disso, Carvalho (2020) ressalta que essas ações facilitam o reconhecimento de medidas de proteção e recuperação ambiental, como a implementação de áreas de preservação permanente, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e a construção de sistemas de tratamento de água e esgoto.

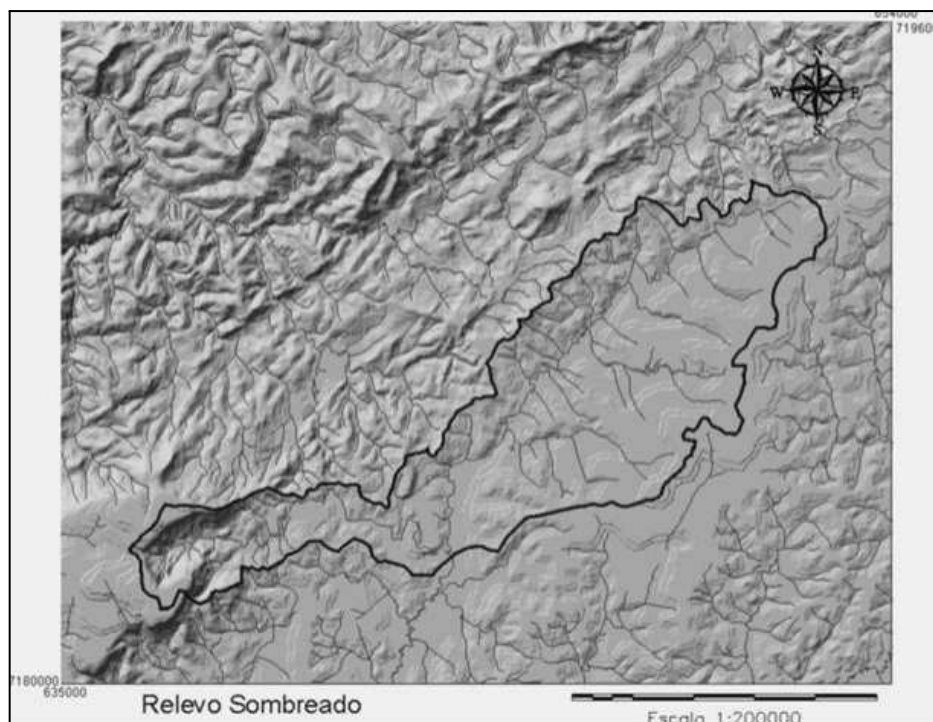
O monitoramento da qualidade da água em uma bacia hidrográfica é essencial para garantir a segurança hídrica e a saúde das comunidades que dependem desses recursos. Com a delimitação das bacias hidrográficas, é possível realizar um monitoramento mais eficaz e direcionado, contribuindo para a preservação e a gestão sustentável dos recursos hídricos (Santos et al. 2019).

3.3 Técnicas para delimitar uma bacia hidrográfica

Nicolete et al. (2015) ressaltam que existem diversas técnicas para delimitar uma bacia hidrográfica, que variam em complexidade e precisão. Uma das abordagens mais tradicionais é o Método da Divisão de Águas, que consiste na identificação da linha divisória entre as áreas que drenam para diferentes cursos d'água. Esse método é baseado na observação das elevações do terreno e na direção do escoamento superficial.

Com o avanço da tecnologia, surgiram métodos mais sofisticados, como os Métodos Digitais, que utilizam sistemas de informações geográficas e modelos digitais de elevação (MDE) para delimitar as bacias de forma mais precisa e eficiente (Goularte et al. 2022). Esses métodos permitem a análise detalhada do terreno e a consideração de diversas variáveis hidrológicas. Como exemplo, a Figura 4 apresenta um MDE da bacia do rio Itaqui, Campo Largo - PR

Figura 4 - Modelo digital de elevação



Fonte: Silva (2011).

Outra abordagem é o uso de métodos estatísticos, que empregam dados de ocorrência, evaporação e vazão para estimar períodos hidrológicos e delimitar as bacias hidrográficas. Esses métodos são úteis quando há disponibilidade de dados hidrológicos históricos e estatísticos (Cordovil, 2001).

Cada um desses métodos possui suas vantagens e limitações, e a escolha da técnica mais adequada depende das características da área de estudo, dos recursos disponíveis e dos objetivos da análise hidrológica. Em geral, uma combinação de diferentes métodos pode fornecer resultados mais precisos e completos na delimitação das bacias hidrográficas.

3.4 Delimitação de microbacias e sua importância para o planejamento da drenagem urbana

Lima (2019) refere que a delimitação de microbacias é fundamental para o planejamento da drenagem urbana por diversos motivos, principalmente pela complexidade e variedade de usos do solo nas áreas urbanas, que afetam diretamente o escoamento das águas pluviais. Uma microbacia é uma área menor dentro de uma bacia hidrográfica maior, caracterizada por apresentar um sistema de drenagem próprio, com seus cursos d'água e áreas de contribuição (Alves, 2017).

Ainda, Mendes e Santos (2022) dizem que ela é fundamental para o planejamento e gestão sustentável da drenagem urbana. Ao identificar e mapear essas áreas menores dentro de uma bacia hidrográfica, será possível realizar um planejamento mais integrado e eficaz das ações de drenagem, levando em consideração as características específicas de cada região.

Com a delimitação das microbacias, é possível identificar problemas locais de retorno, como pontos de inundação recorrente, erosão do solo e interferência de galerias e bueiros. Isso permite priorizar intervenções e investimentos para solucionar esses problemas, reduzindo os impactos negativos das águas pluviais na área urbana (Righetto, 2009).

Ademais, Sabino et al. (2017) citam que a delimitação das microbacias facilita o planejamento da infraestrutura de drenagem, como galerias pluviais, bueiros, canais e reservatórios de retenção. Essa infraestrutura pode ser planejada de forma mais eficiente e adequada às características de cada área, contribuindo para a redução de custos e a otimização dos recursos disponíveis.

A gestão das microbacias também é importante para o controle da qualidade da água, pois permite identificar as áreas mais suscetíveis à contaminação por impurezas transportadas pelas águas pluviais. Com essa informação, é possível implementar medidas de controle e tratamento adequadas para proteger os corpos d'água receptores e garantir a qualidade da água (Bressiani et al. 2016).

Por fim, ao considerar as microbacias no planejamento urbano, é possível promover o desenvolvimento sustentável das cidades, garantindo a preservação dos recursos hídricos e a qualidade de vida da população. Isso inclui a preservação de áreas verdes e de recarga de aquíferos, o controle da impermeabilização do solo e a promoção de práticas de drenagem sustentáveis, como telhados verdes e pavimentos permeáveis.

3.5 Desafios na delimitação de microbacias hidrográficas: tecnologia

Oliveira (2012) analisa que a utilização de drones para a criação de modelos digitais de elevação pode ser uma ferramenta poderosa, mas também pode representar um investimento significativo. A captura de imagens de alta resolução e a posterior elaboração do MDE requerem equipamentos especializados e pessoal qualificado, o que pode resultar em custos consideráveis.

Em muitos casos, especialmente em áreas extensas ou de difícil acesso, os MDE disponibilizados por satélites oferecem uma alternativa viável e mais econômica. Os dados obtidos por satélites podem fornecer informações detalhadas o suficiente para a maioria das aplicações, sem a necessidade de investir em drones e equipamentos associados (Elmiro; Dutra; Mura, 2007).

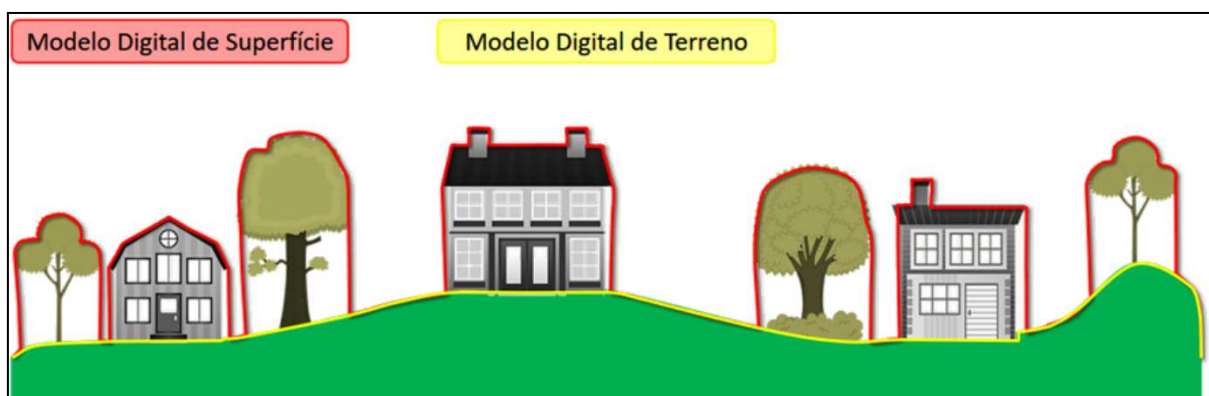
Por outro lado, para optar pela utilização de drones para a criação de MDE, é importante avaliar cuidadosamente as necessidades do projeto, o custo-benefício da utilização de drones em comparação com outras opções disponíveis e a disponibilidade de recursos para realizar e manter essa tecnologia (Alves, 2023).

Em alguns casos, mesmo para microbacias, pode ser mais vantajoso utilizar os MDE disponibilizados por satélites, que fornecem um dado suficientemente próximo para a destinação final.

3.6 Modelos digitais de superfície e de terreno: uma análise comparativa para aplicações em geociências

Lima (2019) menciona que a escolha entre o uso de modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais de terreno (MDT) depende das necessidades específicas de cada projeto e das características da área de estudo. Ambos os tipos de modelos têm suas vantagens e limitações, e a decisão deve levar em consideração diversos fatores, como a precisão requerida, a disponibilidade de dados e os recursos disponíveis. Na Figura 5 é feita uma comparação ilustrativa entre um MDS e um MDT.

Figura 5 - Modelo digital de superfície e modelo digital de terreno



Fonte: Barbo (2019).

O MDT considera apenas a elevação do terreno, sendo útil em estudos topográficos e de engenharia. Já o MDS captura a elevação do terreno e a altura de objetos como edifícios, sendo aplicável em áreas como urbanismo e planejamento ambiental.

O MDT não considera a interferência de objetos na superfície terrestre, enquanto o MDS fornece um panorama mais completo da área de estudo. O MDT é indicado para estudos geológicos e geotécnicos, enquanto o MDS é usado em modelagem de enchentes, visualização 3D e estudos de impacto ambiental (Righetto, 2009).

Para Mendes (2022), os modelos digitais de superfície, obtidos através de satélites como Sentinel e dados de radar, como SRTM e ALOS, são capazes de capturar não apenas a elevação do terreno, mas também a altura de objetos como edifícios, vegetação e outros elementos presentes na superfície terrestre. Ainda para o autor (Mendes, 2022), isso proporciona um panorama mais completo e detalhado da área de estudo, sendo útil para aplicações que requerem informações sobre a altura dos objetos.

Por outro lado, os modelos digitais de terreno consideram apenas a elevação do terreno, desconsiderando a altura de objetos como edifícios e vegetação. Isso pode ser vantajoso em algumas situações, especialmente em estudos topográficos e de engenharia, onde a ênfase está na análise do relevo natural do terreno.

A utilização de drones para a obtenção de dados também tem suas peculiaridades. As imagens obtidas por drones precisam passar por um processo de interpolação dos pontos para a criação do modelo digital, o que pode resultar em uma maior precisão espacial em comparação com os dados de satélite. No entanto, o uso de drones pode ser mais oneroso e requer mais tempo e recursos em comparação com a aquisição de dados de satélite (Sabino et al., 2017).

É importante ressaltar que as imagens de satélite, em geral, possuem uma resolução espacial menor em comparação com os dados obtidos por drones, o que pode afetar a precisão do modelo digital gerado. Além disso, a presença de vegetação densa ou edifícios altos pode interferir na qualidade dos dados de satélite, resultando em uma representação menos precisa da superfície terrestre, contudo, esses dados podem ser tratados, de modo a deixar apenas a superfície.

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Localização da área de estudo

A área de estudo desta pesquisa está localizada no município de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil e inserida na bacia hidrográfica Apodi-Mossoró. Essa bacia hidrográfica corresponde a cerca de 26,8% do território estadual (Mossoró; FVG, 2010), possuindo uma vegetação típica do clima semiárido que é adaptada às altas temperaturas e escassez de água: a caatinga (Sousa, 2006).

Na última delimitação do semiárido nordestino (Figura 6) o estado do Rio Grande do Norte foi classificado como um dos estados que detêm o maior número de municípios inseridos nesse clima, totalizando 140 de 167 municípios (Sudene, 2021).

Figura 6 - Delimitação do semiárido nordestino atualizada no ano de 2021



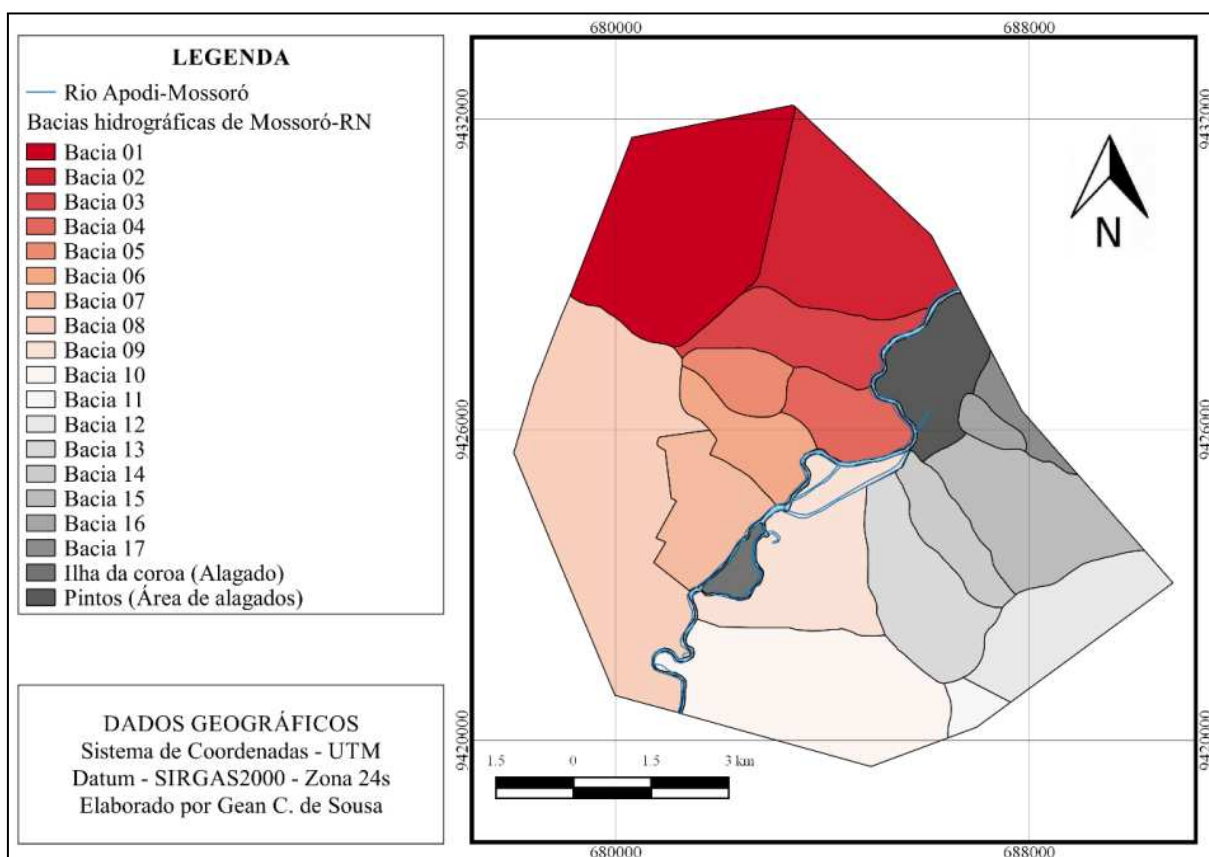
Fonte: Sudene (2021).

O clima semiárido, caracterizado pela elevada taxa de evaporação e bacias hidrográficas de baixo volume (Vale, 2020), recebeu, pela Constituição Federal de 1988, uma priorização nas políticas e ações governamentais na área social. Essa concessão destaca-se pelo reconhecimento do semiárido como uma região do Brasil onde a pobreza se consolidou a partir de fatores estruturais e históricos (Sudene, 2021).

Além disso, mesmo que o semiárido no Nordeste brasileiro seja um dos mais chuvosos no planeta, com precipitação média anual de 750 mm (Gomes, 2023), Mossoró se encontra abaixo desse valor, com uma precipitação média anual de 670 mm (Santos, 2014) e concentra suas chuvas durante o período de fevereiro à maio (Monteiro, 2012). Entretanto, mesmo diante dessa quantidade relativamente escassa de chuvas, Mossoró não está isenta de problemas comuns a áreas urbanas, especialmente no que diz respeito à drenagem urbana.

A Secretaria Municipal de Infraestrutura, Meio Ambiente, Urbanismo e Serviços Urbanos de Mossoró define um sistema de esgotamento sanitário composto por dezessete bacias, que engloba todos os bairros de Mossoró. Essa delimitação de bacias está ilustrada na Figura 7, produzida por Sousa (2007).

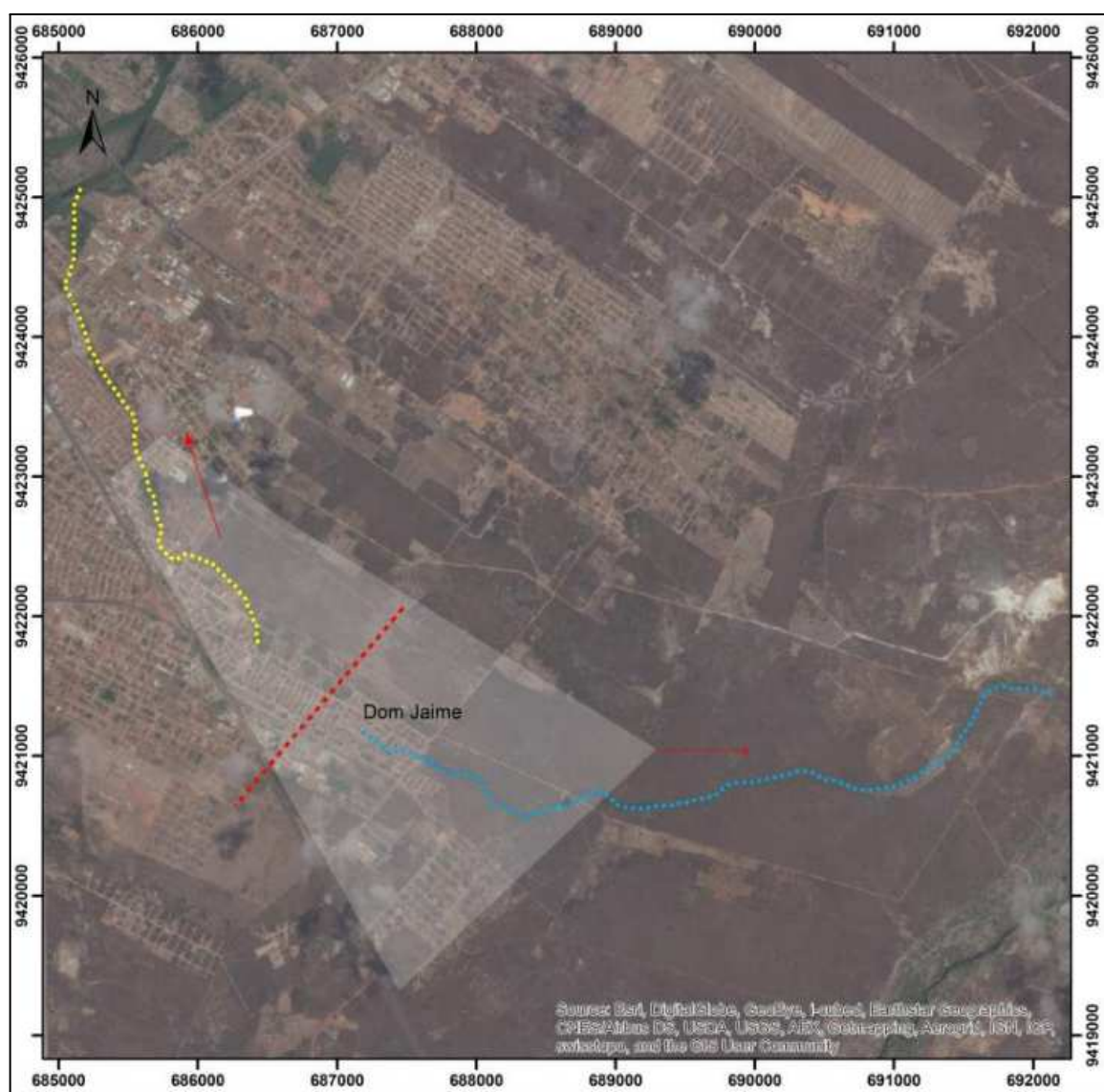
Figura 7 - Mapa das bacias urbanas de esgotamento sanitário



Fonte: Sousa (2017)

Ademais, a microbacia delimitada nesta pesquisa está inserida no sistema de bacias número treze (bacia 13), localizado no bairro Dom Jaime Câmara. O canal do bairro possui um divisor de águas, em que uma parte da água pluvial é escoada para o Rio Apodi-Mossoró (lado esquerdo) e a outra parte para o Rio Angicos (lado direito). Na Figura 8, a drenagem para o Rio Apodi-Mossoró e para o Rio Angicos está nas cores amarelo e azul, respectivamente. Mais especificamente, a microbacia delimitada nesta pesquisa está contida na rede de drenagem urbana que escoar para o Rio Angicos.

Figura 8 - Delimitação espacial da Bacia de esgotamento sanitário no Bairro Dom Jaime Câmara para o plano Municipal de Saneamento Básico de Mossoró - RN



Fonte: Mossoró; Start (2016).

O diagnóstico técnico-participativo (Mossoró; Start, 2016) desenvolvido para o plano Municipal de Saneamento Básico de Mossoró - RN (2019) enfatiza que os canais que cortam o bairro Dom Jaime Câmara possuem disposição de esgoto doméstico e resíduos, além de estarem localizado entre as residências e, em alguns trechos, passarem por baixo de construções (Figura 9 e Figura 10).

Figura 9 - Canal passando com disposição para resíduos entre as residências do bairro Dom Jaime Câmara, em Mossoró - RN



Fonte: Street View - Google Maps (2022).

Figura 10 - Vista do canal do bairro Dom Jaime Câmara no município de Mossoró - RN



Fonte: Street View - Google Maps (2022).

A problemática enfatizada no diagnóstico técnico-participativo ainda persiste no bairro e também em todo o município, se agravando em épocas em que há uma intensidade maior de chuvas na região, pois os resíduos acumulados no sistema de drenagem bloqueiam o escoamento e causam transtornos na cidade, como transbordamento do rio, que vazam para as vias públicas e alagamento das áreas ribeirinhas, onde ocupações irregulares nas proximidades dos leitos dos rios foram facilmente localizadas pela empresa (Mossoró; Start, 2016).

Esses problemas se devem muito ao fato de que não há uma devida atenção a esse eixo do saneamento, principalmente por Mossoró possuir um histórico de baixa pluviosidade. Além disso, o Poder Público Municipal prioriza adotar medidas corretivas e estruturais, desconsiderando em muitos casos a adoção de medidas preventivas através de um Plano Diretor de Drenagem Urbana, o qual, de acordo com o Instituto Água e Saneamento (2021), o município de Mossoró não possui.

4.2 Materiais utilizados e etapas metodológicas

Neste estudo, foram criadas três delimitações distintas de uma mesma microbacia, utilizando três modelos digitais de elevação com variação na resolução espacial (30, 12,5 e 1 metro, sendo o último produzido por reamostragem). Dos modelos digitais utilizados para as três delimitações, dois deles foram disponibilizados gratuitamente por bancos de dados científicos *on-line* (30 e 12,5 metros), enquanto o terceiro, com maior resolução espacial, foi gerado computacionalmente através da interpolação de dados altimétricos reamostrados de um banco altimétrico com menor resolução (SRTM - 90 metros), também obtidos *on-line* pela plataforma GPS Visualizer.

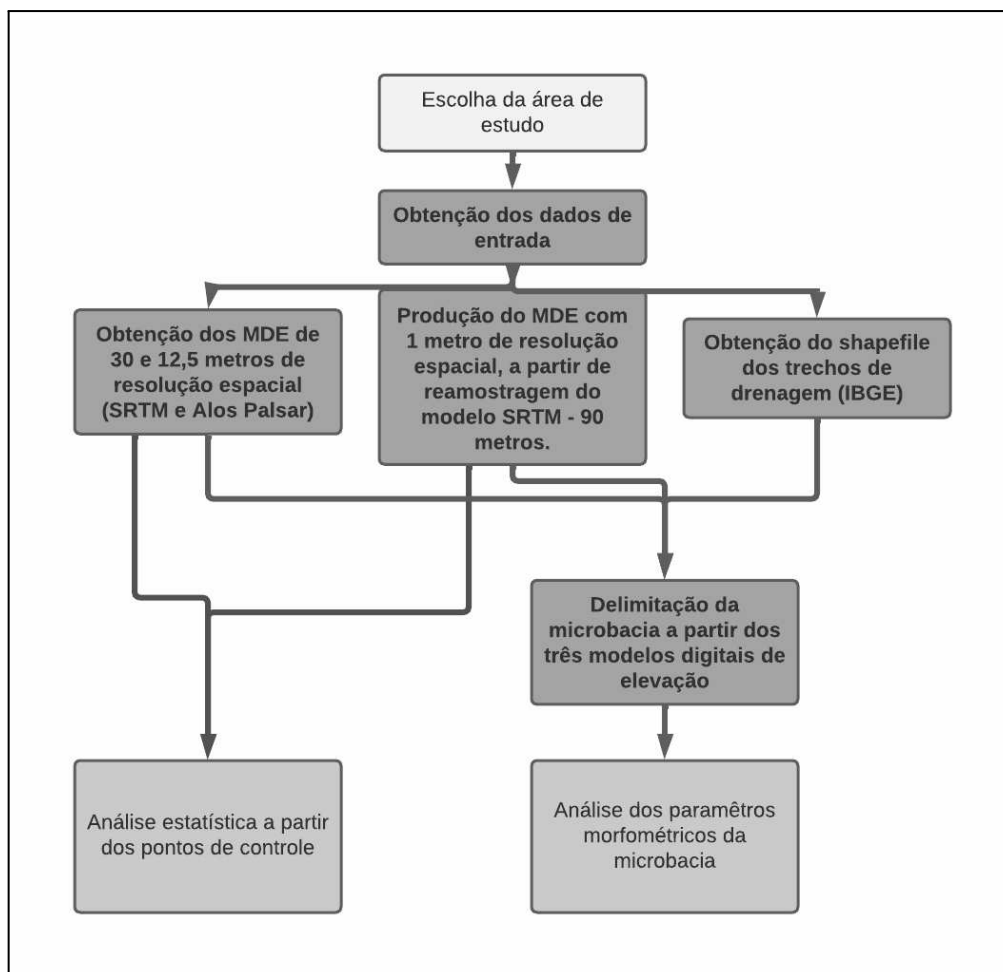
O intuito é investigar os impactos da resolução espacial na determinação das características morfométricas das microbacias e apontar qual modelo digital de elevação possui maior exatidão em representar a microbacia que engloba o bairro Dom Jaime Câmara.

Para a validação dos modelos foram coletados pontos de controle em campo com o equipamento RTK. Esses pontos foram empregados para analisar a variação dos dados altimétricos reais em comparação com os dados altimétricos obtidos dos modelos.

A seguir, está a lista dos materiais utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, incluindo *softwares* e plataformas, seguida por um fluxograma geral das etapas metodológicas (Figura 11).

- *Shapefile* dos limites nacional, estadual e municipal e também do *shapefile* dos cursos de água (IBGE, 2023), para identificação espacial, elaboração de mapa de localização e recorte do curso d'água presente na área de estudo;
- Dados SRTM com uma resolução espacial de 30 metros, disponíveis gratuitamente através do United States Geological Survey, fundamentais na geração do limite da microbacia e podem ser acessados através da carta s06_w038_1arc_v3;
- Dados Alos Palsar com uma resolução espacial de 12,5 metros, disponíveis gratuitamente através do Earth Science Data Systems, fundamentais na geração do limite da microbacia e podem ser acessados através da carta AP_26270_FBS_F7080_RT1;
- GPS Visualizer, plataforma *on-line*, utilizada para extrair da web e importar dados de elevação em pontos aleatórios no formato KML e posterior produção por reamostragem do modelo digital de elevação de 1 metro de resolução espacial de um modelo com resolução menor (SRTM - 90 metros);
- Equipamento RTK (Real-time Kinematic), um sistema de posicionamento que utiliza receptores Global Navigation Satellite System (GNSS) para fornecer coordenadas geográficas precisas em tempo real.
- QGIS 3.34, *software* gratuito e de código aberto, utilizado para a edição, visualização, criação de mapas e processamento de dados geoespaciais, com projeção de projeto EPSG:31984 - SIRGAS 2000 / UTM zone 24S.

Figura 11 - Fluxograma metodológico geral da pesquisa



Fonte: Autoria própria, 2024.

4.2.1 Obtenção dos dados de entrada

O método para a delimitação da microbacia de drenagem de estudo é idêntico para os MDE no formato *raster* (Geotiff) com tamanho de célula de 30, 12,5 e 1 metro (pixel), sendo este último produzido a partir de reamostragem de dados. Entretanto, se diferenciam nas origens de obtenção desses modelos. Segundo Azevedo (2022), imagens no formato *raster* são imagens matriciais compostas por pixels capazes de armazenar diversas informações, muito úteis para o geoprocessamento.

Também, a delimitação da microbacia a partir do MDE, reamostrado a partir de dados SRTM - 90 metros, com resolução espacial de 1 metro (reamostrado), possui apenas uma etapa que difere das outras delimitações, que é a etapa de preenchimento de células falhas (*Fill Sinks*). Essa etapa torna-se dispensável para o MDE com resolução espacial de 1

metro (reamostrado) porque esse MDE é um produto computacional, como será demonstrado no item 4.2.2 desta pesquisa.

O MDE, do tipo MDS, com resolução espacial de 30 metros foi extraído do banco de dados do Earth Resources Observation and Science (EROS), no *site* da United States Geological Survey (USGS), uma instituição estadunidense que controla a EROS. A National Aeronautics and Space Administration (NASA) foi uma das instituições responsáveis pela missão de mapeamento global SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM), que produziu as imagens com acurácia espacial mínima de 30 m, em fevereiro de 2000, disponíveis gratuitamente no *site* da USGS.

Já o MDE, também do tipo MDS, com resolução espacial de 12,5 metros foi extraído do banco de dados do Earthdata, *site* também estadunidense, que distribui dados do Earth Science Data Systems (ESDS), outro programa que fornece acesso total e aberto a um conjunto de dados espaciais da NASA, incluindo os dados do projeto japonês Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). A JAXA foi responsável pela produção das imagens com resolução espacial de 12,5 metros do produto altimétrico ALOS PALSAR, em julho de 2007.

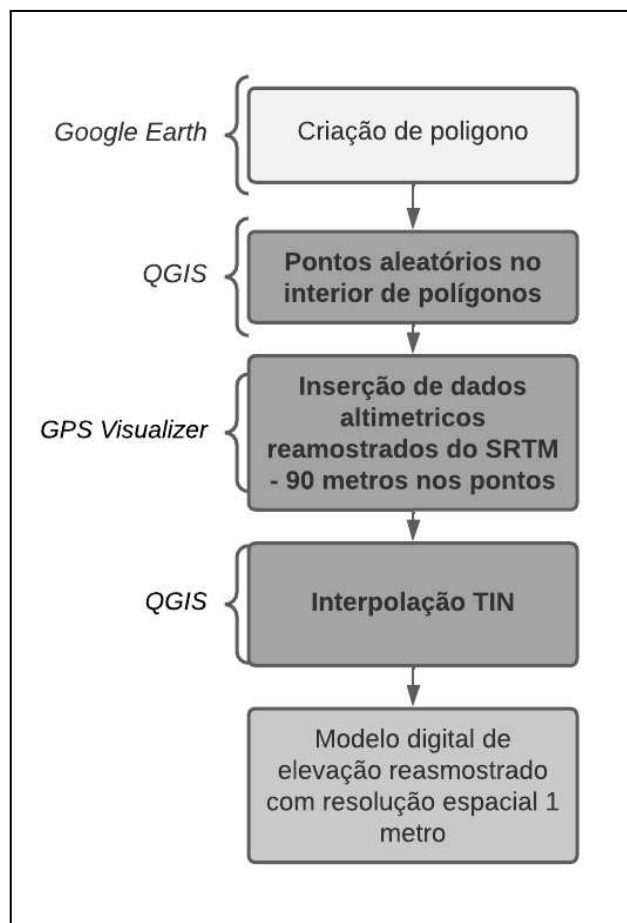
Além disso, a delimitação do curso d'água principal da área de estudo desta pesquisa foi extraído do arquivo *shapefile* de trechos de drenagem em nível nacional, na escala 1:250.000, acessível ao público no banco de dados de base cartográfica contínua do IBGE (2023).

4.2.2 Produção do MDE com resolução espacial de 1 metro (reamostrado)

O procedimento para a obtenção desse modelo digital de elevação envolve o uso de diversos *softwares* e plataformas virtuais para a conversão de dados (Figura 12). A lógica do processo consiste em transformar pontos gerados computacionalmente em bits, ou pixels, capazes de armazenar dados geográficos de relevo extraídos do *software* georreferenciado *Google Earth Pro®* através da plataforma *on-line* GPS Visualizer.

Com os pixels, agora contendo informações altimétricas, é possível realizar uma interpolação espacial para gerar uma superfície de relevo no formato *raster* e prosseguir com a delimitação da microbacia de drenagem urbana.

Figura 12 - Fluxograma de obtenção do modelo digital com resolução espacial de 1 metro (reamostrado)



Fonte: Autoria própria (2024).

O propósito é obter uma imagem de alta resolução espacial para permitir a verificação da variação dos parâmetros em um modelo derivado de uma reamostragem de pontos. Essa verificação buscou validar a usabilidade da reamostragem de pontos a partir de uma imagem de baixa resolução espacial, além de avaliar o quão próximo esse modelo reamostrado está da realidade.

Os modelos digitais de elevação com essa qualidade de resolução espacial ainda não estão disponíveis e só podem ser obtidos por meio de reamostragem de dados, como a realizada nesta pesquisa.

A validação do uso de uma imagem de alta resolução espacial, ainda que derivada de um banco de dados com resoluções mais baixas, têm o potencial de ampliar as opções de

análise e processamento de dados de superfícies terrestres em áreas de estudo pequenas, incluindo a região abordada neste estudo em particular.

No *software Google Earth Pro®*, foi necessário realizar um processo manual de criação de um polígono que abrangesse a área de estudo, incluída no bairro Dom Jaime Câmara. É importante que a forma do polígono criado se aproxime de um retângulo, com ângulos internos de 90°, pois essa escolha evitará cantos irregulares na imagem, onde o algoritmo não consegue interpolar.

O polígono criado, salvo no formato "KML" - formato para exibir dados geográficos nas plataformas da empresa *Google* -, foi exportado no *software* QGIS 3.34, no formato "*shapefile*", que é utilizado para armazenamento de dados vetoriais.

Com o polígono transformado em vetor, seguiu-se para a criação de pontos aleatórios dentro desse polígono vetorial, utilizando o algoritmo presente no QGIS 3.34. Como parâmetro de entrada para o algoritmo "Pontos Aleatórios no Interior de Polígonos", foi especificada a criação de 10.000 pontos.

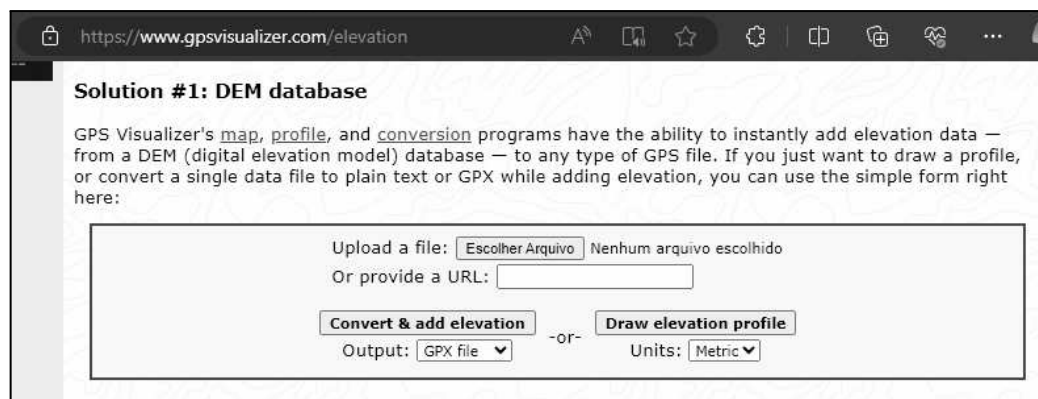
A escolha dessa quantidade pontos para a criação dos pontos aleatórios dentro do polígono vetorial foi determinada levando em conta a capacidade de processamento disponível do computador utilizado na pesquisa, já que a quantidade de pontos criados influencia diretamente na capacidade de processamento exigida do computador durante a interpolação dos dados para gerar a imagem final.

Após análises prévias este número foi considerado apropriado para garantir uma interpolação eficiente dos dados, sem sobrecarregar excessivamente o sistema e garantindo a qualidade dos resultados obtidos.

Ademais, com os pontos criados, a próxima etapa exige anexar dados altimétricos a esses pontos, com dados coordenados geograficamente pelo *Google Earth Pro®*. Para isso, foi necessária a utilização do *site* GPS Visualizer, um utilitário que cria mapas e perfis a partir de dados geográficos *on-line*, mas que também é capaz de anexar os dados altimétricos aos pontos em sua sub-aba "Elevation" (Figura 13).

O arquivo output, contendo os pontos com os dados altimétricos, foi extraído do *site* no formato "GXP", que é um formato que permite o armazenamento e processamento de dados GPS (dados geográficos). Novamente no QGIS 3.34, foi extraída a camada "KML" dos pontos com dados altimétricos, denominada "*waypoints*", do arquivo GPX, ao abri-lo.

Figura 13 - Vista do *site* GPS Visualizer na aba "Elevation"

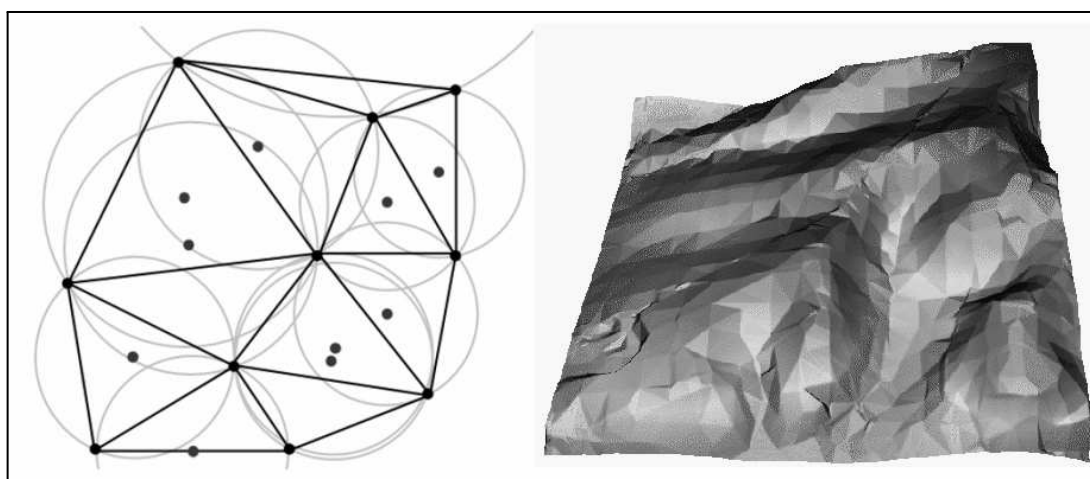


Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, foi necessário transformar essa camada "KML" em uma camada vetorial "SHP" e, em posse da camada vetorial do tipo ponto, que possui dados altimétricos, utilizou-se do algoritmo "Interpolação TIN" para produzir a imagem MDE.

O algoritmo de Malha Irregular Triangulada (ou interpolação TIN) busca estabelecer uma superfície por meio da formação de triângulos a partir dos pontos vizinhos mais próximos (QGIS, 2024). Para realizar esse procedimento, são gerados circuncírculos em torno dos pontos amostrais escolhidos, e suas interseções são então conectadas a uma malha que evita sobreposições e visa a criação de triângulos tão compactos quanto possível (Figura 14).

Figura 14 - Demonstração de uma superfície produzida pelo algoritmo "Interpolação TIN" a partir de pontos altimétricos



Fonte: QGIS (2024).

A técnica de interpolação por algoritmo utiliza pontos vetoriais com valores conhecidos para estimar valores locais desconhecidos, abrangendo toda a extensão da superfície em questão, resultando em uma camada de MDE. Os parâmetros utilizados no

algoritmo "Interpolação TIN" para obter o MDE com resolução de 1 metro (reamostrado) foram (Figura 15):

- atributo "ele" como atributo de interpolação;
- uso da camada Z para a interpolação;
- adição da camada vetorial;
- método linear de interpolação;
- camada de pontos vetoriais na extensão para interpolar;
- tamanho do pixel igual a 1 metro (reamostrado) para os eixos X e Y.

Figura 15 - Vista da tela de execução do algoritmo "Interpolação TIN" no *software* QGIS, com os parâmetros de entrada seleccionados para a produção do modelo digital de elevação de 1 metro (reamostrado)

Interpolação TIN

Parâmetros Log

Camada(s) de entrada

Camada vetorial: pontos aleatorios para interpolar

Atributo de interpolação: 1.2 ele

☒ Usar Coordenada Z para interpolação

Camada vetorial	Atributo	Tipo
pontos alea...	Z_COORD	Pontos

Método de interpolação: Linear

Extensão: 686266.9326,689809.5160,9419266.0870,9422598.9830 [EPSG:31984]

Tamanho do raster de saída

Linhas: 3334 Colunas: 3544

Tamanho do pixel X: 1,000000 Tamanho do pixel Y: 1,000000

Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.3 Pontos de controle

A operação de levantamento topográfico dos pontos de controle foi conduzida no bairro Dom Jaime, no dia 15 de março de 2024, utilizando o equipamento RTK (Real-time Kinematic).

O RTK é um equipamento de posicionamento que utiliza a transmissão instantânea de correções de sinais de satélites para fornecer coordenadas precisas em tempo real dos pontos levantados. Ele opera através de receptores GNSS, que trocam informações entre um receptor base estático e um receptor móvel, permitindo a obtenção de correções precisas da posição.

O alcance da transmissão de rádio pode ser limitado pela potência do rádio e pela topografia da área, mas em áreas pequenas e sem edifícios altos, como a área de estudo dessa pesquisa, a interferência tende a ser mínima. Para esta pesquisa, foi utilizado o receptor GNSS modelo X91 da marca CHC©.

Para Barbosa (2010), o princípio fundamental do RTK é a alta correlação dos erros da ionosfera, troposfera e órbita dos satélites entre a estação de referência e uma estação próxima, aliado à existência de um link de comunicação para enviar os dados coletados ao usuário.

A coleta de dados exigiu aproximadamente duas horas de trabalho e envolveu uma equipe composta por um técnico responsável por manter a estabilidade e monitoramento da base do RTK (Figura 16), dois alunos encarregados de coletar os pontos dispersos no bairro e um motorista, todos vinculados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

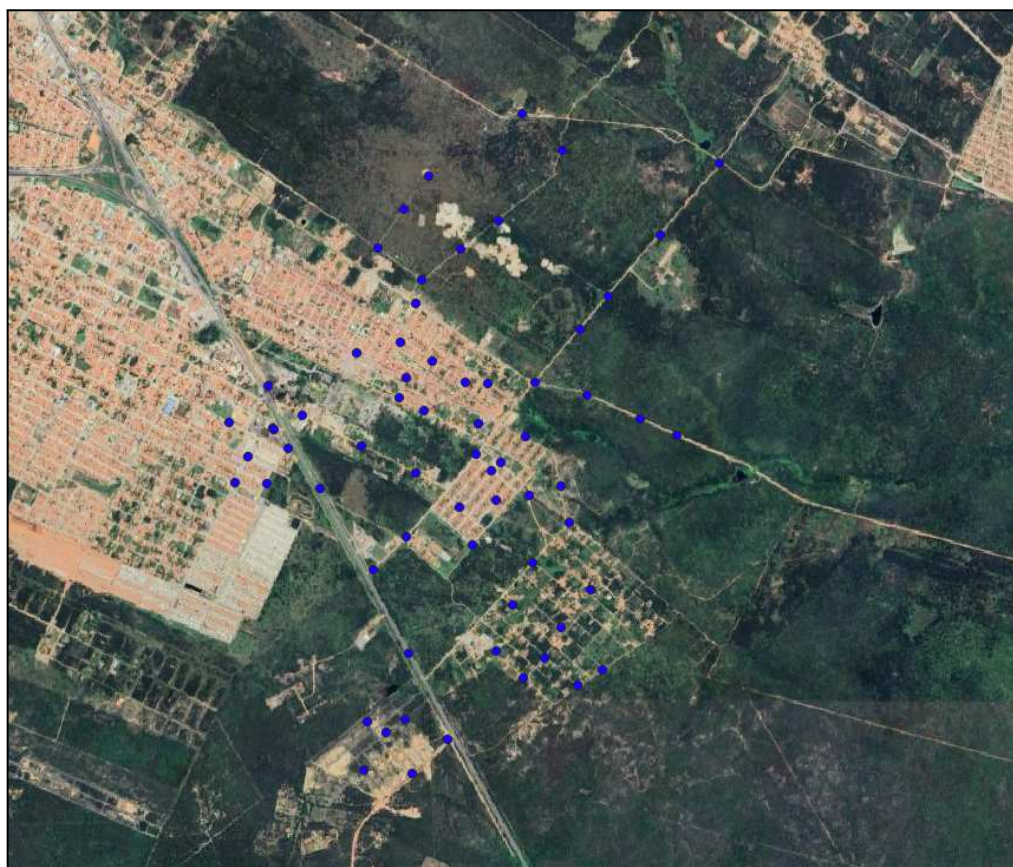
Figura 16 - Base RTK instalada, antes do início do levantamento altimétrico



Fonte: Autoria própria (2024).

Foram selecionados sessenta e seis (66) pontos ao longo das vias do bairro, incluindo o ponto de base. Eles foram distribuídos de maneira dispersa para garantir uma representação completa da área, priorizando pontos de fácil acesso e com poucos edifícios altos, a fim de minimizar possíveis interferências. Na Figura 17 estão representados os pontos coletados.

Figura 17 - Representação no *software* QGIS 3.34 dos pontos coletados (em azul) a partir do levantamento sob o bairro Dom Jaime Câmara



Fonte: Autoria própria (2024).

Após a coleta dos dados em campo, utilizando o QGIS 3.34, as altimetrias e coordenadas geográficas dos pontos de controle foram comparadas com os dados altimétricos dos modelos digitais obtidos (MDE de 30, 12,5 e 1 metro, sendo o último produzido por reamostragem), para as mesmas coordenadas de controle. Esses dados estão disponíveis no Apêndices A e serão comentados na seção de resultados.

Para avaliar a exatidão dos modelos digitais de elevação a partir dos dados coletados nos pontos de controle, o método utilizado foi a comparação entre as somas das diferenças (ou distâncias) altimétricas entre os pontos extraídos dos modelos e os pontos coletados em campo.

Para cada linha de dados da tabela presente no Apêndice A, a diferença em módulo, ponto a ponto, foi calculada de forma automática no Google Docs, utilizando a Equação 01, para cada ponto em cada modelo.

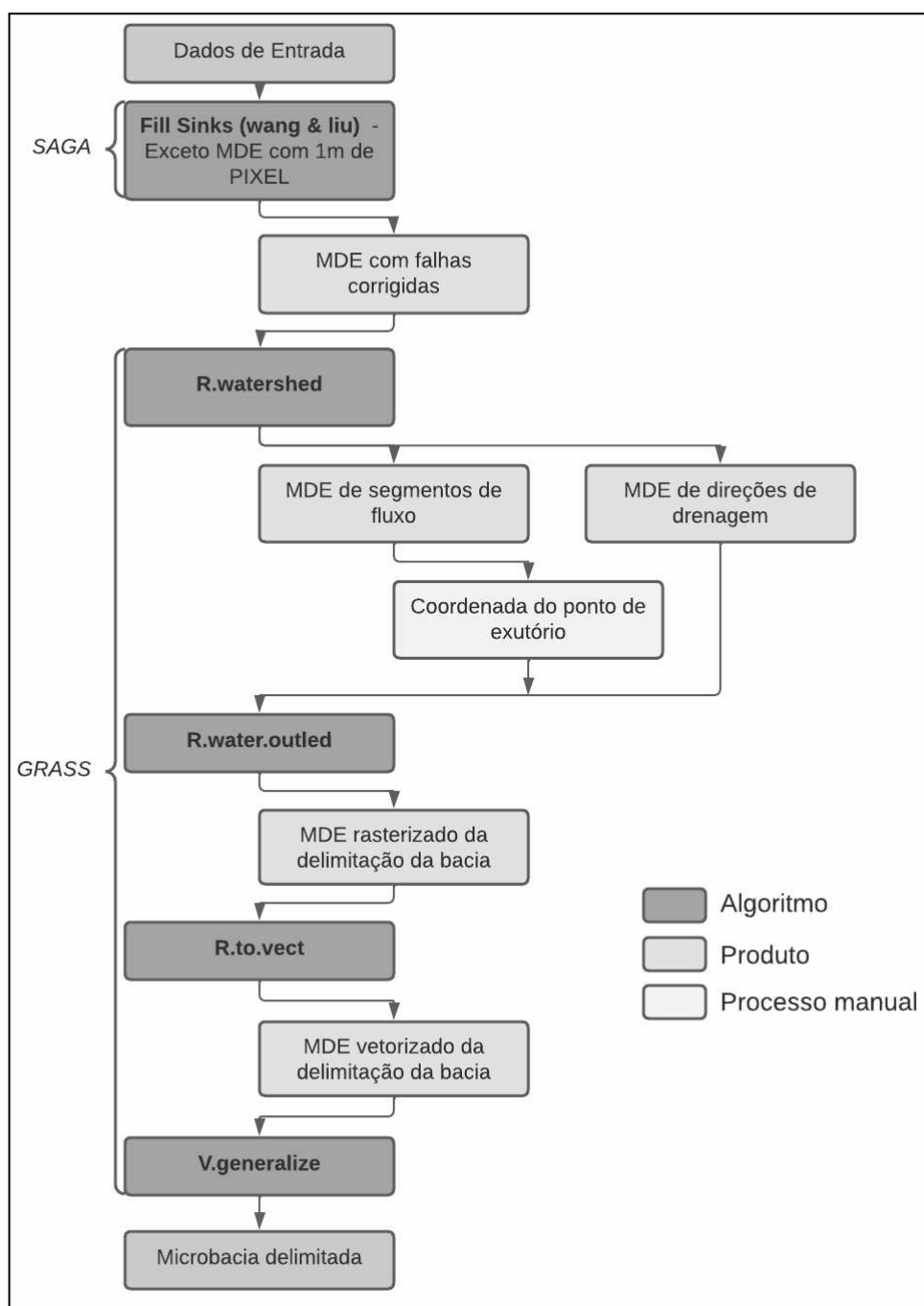
$$\text{Diferença} = | \text{Altitude_PontoX_MDE30m} - \text{Altitude_PontoX_Controle} | \quad (01)$$

Após obtidas todas as diferenças, em módulo, para cada ponto e para cada modelo, as diferenças encontradas para cada modelo foram somadas. O valor numérico obtido para a soma das diferenças, ou distâncias, representa o quão próximo os valores obtidos se aproximam dos pontos de controle. Logo, o modelo mais exato em representar a área de estudo será aquele que obtiver o menor valor numérico para a soma das diferenças.

4.2.4 Delimitação da microbacia a partir do MDE nas diferentes resoluções espaciais

A Figura 18 exibe o fluxograma que ilustra as etapas e algoritmos empregados na delimitação da microbacia, utilizando três modelos digitais de elevação com resoluções espaciais distintas. Todas essas etapas foram realizadas no *software* QGIS, na versão 3.34.

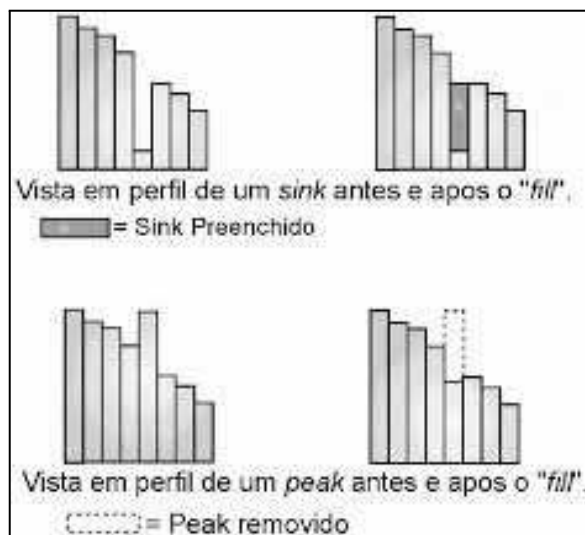
Figura 18 - Fluxograma do procedimento metodológico para a delimitação da microbacia de drenagem urbana nesta pesquisa



A primeira etapa para o processamento dos MDE de pixel 30 e 12,5 metros foi a aplicação do algoritmo *Fill Sinks*, proposto por Wang e Liu (2006). Esse algoritmo é fornecido pelo Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado (SAGA), no *software* QGIS 3.34, e preenche (*sinks*) ou remove (*peaks*) erros superficiais esporádicos em modelos digitais

de elevação (Figura 19). Vale ressaltar que essa etapa é dispensável para o método que utiliza o MDE de 1 metro (reamostrado).

Figura 19 – Vista em perfil de um *sink* e um *peak*

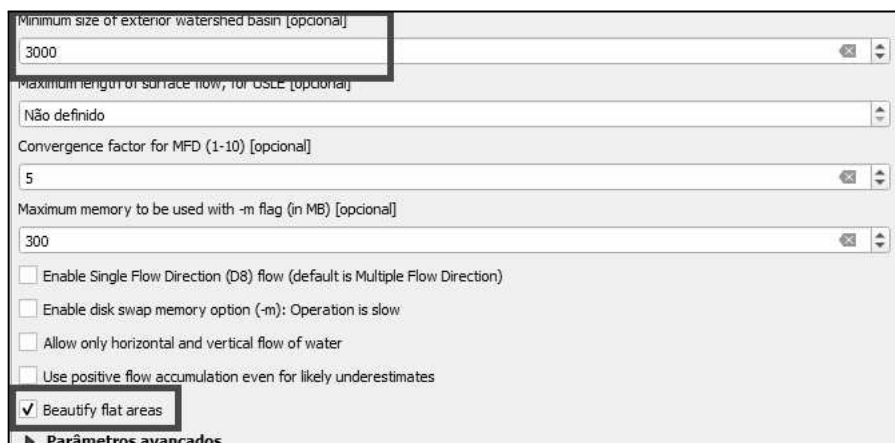


Fonte: Torres *et. al.* (2004).

Com o resultado do algoritmo *Fill Sinks* (Wang e Liu), que gera uma nova camada MDE com as depressões e elevações corrigidas, camada nomeada de "Filled DEM", foi utilizado o próximo algoritmo: *r.watershed*. Esse algoritmo, agora fornecido pelo Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), calcula parâmetros hidrológicos, como as direções de drenagem e os segmentos de fluxo do terreno.

Na Figura 20, a tela de execução do algoritmo, em que os parâmetros de entrada opcionais para esse algoritmo que foram considerados são: a aplicação do valor 3000 para o "tamanho mínimo da bacia externa" ou "*minimum size for exterior basin watershed*", e a caixa de escolha "embelezar áreas planas" ou "*beautify flat areas*" foi habilitada.

Figura 20 - Vista da tela de execução do algoritmo "r.watershed" no *software* QGIS, com os parâmetros de entrada selecionados para a produção das camadas de direção de drenagem e segmento de fluxo

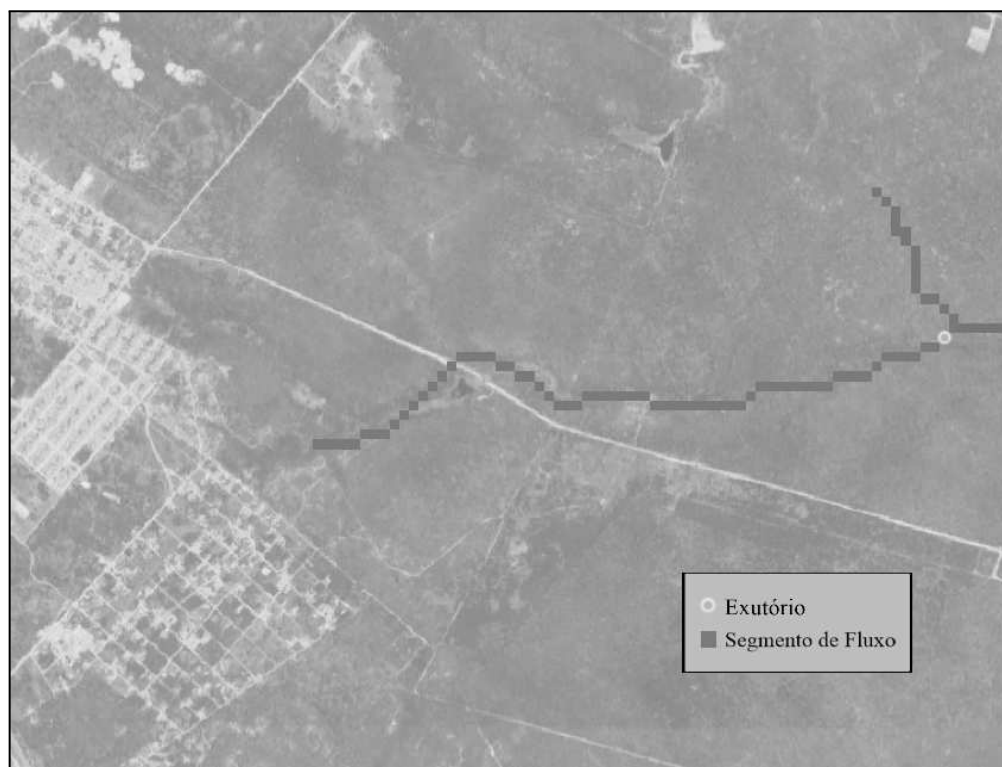


Fonte: Autoria própria (2024).

Resultado de cálculo desse algoritmo, a direção do fluxo ou de drenagem indica para onde o fluxo deve se dirigir a partir de uma célula principal, levando em consideração a declividade das células vizinhas. Já os segmentos de fluxos indicam quantas células uma determinada célula recebe de contribuição em uma nova camada raster.

Com o MDE de segmentos de fluxo gerado pela imagem com resolução de 30 m, foi possível determinar a coordenada do ponto de exutório da microbacia de drenagem urbana estudada. O ponto escolhido para o exutório foi o ponto de menor altitude dentro do canal presente na microbacia, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Ponto de exutório na microbacia de estudo, escolhido a partir do segmento de fluxo gerado pelo modelo digital de elevação de 30 m



Fonte: Autoria própria (2024).

Vale ressaltar que o ponto de exutório escolhido a partir do segmento de fluxo gerado pelo MDE de 30 metros também foi utilizado para delimitar a microbacia nos outros modelos com 12,5 e 1 metro (reamostrado) de resolução espacial.

Com a camada MDE de direção de drenagem e a partir do ponto de exutório escolhido ($5^{\circ}14'7.96''S$, $37^{\circ}16'50.00''O$), utilizou-se o algoritmo `r.water.outlet` (GRASS) para produzir uma nova camada MDE, que representa a delimitação da área da microbacia de drenagem urbana estudada.

Contudo, essa imagem não é a final, pois o resultado dessa delimitação é gerado com bordas irregulares, como mostrado na Figura 22. Primeiramente, para suavizar as bordas, foi necessário converter o novo MDE para um outro tipo de dado geográfico no formato vetorial.

Figura 22 - Em vermelho bordas suavizadas pelo algoritmo "r.water.outlet" e em verde bordas ásperas, no QGIS



Fonte: Autoria própria (2024).

Uma imagem no formato vetorial é capaz de representar áreas, pontos e linhas de forma mais simples do que uma imagem no formato *raster*, que pode conter informações em cada pixel da imagem. Uma imagem do tipo vetorial ocupa menos espaço de armazenamento em disco e pode oferecer uma representação mais objetiva da microbacia estudada, além de simplificar o algoritmo de suavização de borda do polígono.

Após a conversão do modelo digital de elevação para o formato vetorial, utilizando o algoritmo *r.to.vect* (GRASS), foi empregado o algoritmo *v.generalize*, escolhendo o parâmetro "chaiken" como algoritmo de generalização para suavizar as bordas e obter a delimitação da microbacia para cada resolução do modelo digital de elevação.

As curvas de níveis foram geradas a partir da camada Filled DEM, recortada pela camada de máscara vetorizada da microbacia delimitada, pelos passos no QGIS 3.34: *Raster > Extrair > Contorno > Equidistância entre contornos = 5 > Executar*.

Por fim, o arquivo *shapefile* dos trechos de drenagem em nível nacional, obtido a partir do banco de dados do IBGE e atualizado em 2023, foi recortado pelas camadas de máscara das microbacias delimitadas, resultando nos cursos d'água correspondentes a cada delimitação, com seus respectivos comprimentos.

4.2.5 Parâmetros morfométricos da microbacia delimitada

As características morfométricas do padrão de drenagem e do relevo refletem algumas propriedades do terreno, como infiltração e deflúvio das águas das chuvas, e expressam estreita correlação com a litologia, estrutura geológica e formação superficial dos elementos que compõem a superfície terrestre (Pissarra et al., 2004).

Nessa pesquisa, os parâmetros morfométricos para as três delimitações da microbacia estudada foram divididos nas três categorias classificadas por Tonello (2005): características geométricas, características do relevo e características de rede de drenagem (Quadros 1 à 3).

Além disso, de acordo com Christofolletti (1980) os parâmetros morfométricos (ou índices) similares podem ser comparados entre si para obter resultados que sejam mais fiéis à realidade, além de fornecerem informações importantes para a compreensão da rede de drenagem.

Para analisar a dispersão dos dados, foi calculado o coeficiente de variação para cada parâmetro morfométrico através do método proposto por Gomes (1990) pela Equação 02 (adaptada).

$$CV = \frac{\text{desvio padrão } (P30; P12,5; P1)}{\text{média } (P30; P12,5; P1)} * 100 \quad (02)$$

em que:

CV = coeficiente de variação, %;

P30, P12,5 e P1 = valores relativos aos parâmetros morfométricos estudados dos modelos com resolução espacial de 30, 12,5 e 1 m, respectivamente.

Esta categorização leva em conta que os coeficientes de variação são classificados como baixos, quando são inferiores a 10%; médios, quando estão na faixa de 10 a 20%; altos, entre 20 e 30%; e muito altos, se ultrapassam 30%.

Um baixo coeficiente de variação (CV) indica que os valores de um conjunto de dados têm uma variabilidade relativamente pequena em relação à média. Em outras palavras, quando o CV é baixo, os valores estão mais próximos da média, sugerindo uma maior homogeneidade ou consistência nos dados.

4.2.5.1 Características geométricas

As fórmulas para obtenção dos parâmetros morfométricos geométricos (Quadro 1) foram baseados em: Gravelius (1914) - coeficiente de compacidade; Vilella e Mattos (1975) - coeficiente de forma e Mosca (2003) - índice de circularidade e razão de alongação.

Quadro 1 - Características geométricas de bacias hidrográficas, fórmulas, legenda e comentário

Parâmetro morfométrico	Fórmula	Legenda	Comentário
At - Área total de drenagem (m²)	-	Obtida através do software QGIS 3.34	Uso da ferramenta "Identificar Feições"
Au - Área urbanizada (m²)	-	Obtida através do software QGIS 3.34	Delimitação manual
Ar - Área não-urbanizada (m²)	$Ar = At - Au$	At = área total e Au = área urbanizada	-
P - Perímetro total (m)	-	Obtido através do software QGIS 3.34	Uso da ferramenta "Identificar Feições"
Kc - Coeficiente de compactidade	$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{At}}$	Sendo: P = perímetro e A = área total de drenagem.	Tende a unidade quanto mais circular for a bacia
Kf - Fator de forma	$F = \frac{At}{L^2}$	Sendo: At = área total de drenagem e L = máximo comprimento da bacia a partir do ponto de exutório.	Tende a unidade quanto mais circular for a bacia
Ic - Índice de circularidade	$Ic = \frac{At}{Ac}$	Sendo: At = área total de drenagem e Ac = Área de um círculo do tamanho do perímetro da bacia	Tende a unidade quanto mais circular for a bacia
Rea - Razão de alongação	$Rea = 1,128 * \left(\frac{At}{L}\right)^{0,5}$	Sendo: At= área total de drenagem e L = máximo comprimento da bacia a partir do ponto de exutório.	Tende a unidade quanto mais circular for a bacia

Fonte: Autoria própria (2024).

A área total ou de drenagem define a superfície plana demarcada pelo divisor de águas, sendo crucial para determinar a potencialidade hídrica da bacia hidrográfica (Garcez; Alvarez, 1988). O perímetro da bacia representa a extensão da linha em torno da área de drenagem. Os valores numéricos de ambos os parâmetros e também do comprimento axial da bacia foram obtidos para cada delimitação da microbacia no QGIS 3.34, utilizando a ferramenta "Identificar Feições".

A área urbanizada foi delineada manualmente no QGIS 3.34, com auxílio do complemento *HCMGIS*, que importa mapas do banco de dados do *Google*, para facilitar a visualização. A partir dessa delimitação (exportada como *shapefile*), a ferramenta "recortar *raster* pela camada de máscara" foi utilizada para obter a área urbanizada para cada delimitação, subtraindo-a da área total. O cálculo dos valores das áreas não-urbanizadas das três delimitações foi realizado pela subtração das áreas totais pelas áreas urbanizadas respectivamente.

4.2.5.2 Características do relevo

As fórmulas para obtenção dos parâmetros morfométricos do relevo (Quadro 2) foram baseados em: Christofolletti (1980) - amplitude altimétrica, declividade e textura topográfica.

Quadro 2 - Características do relevo de bacias hidrográficas, fórmulas, legenda e comentário

Parâmetro morfométrico	Fórmula	Legenda	Comentário
Amáx - Altitude máxima do curso d'água principal (m)	-	Obtida através do software QGIS 3.34	Uso da ferramenta "Profile Tool"
Amín - Altitude mínima do curso d'água principal (m)	-	Obtida através do software QGIS 3.34	Uso da ferramenta "Profile Tool"
Améd - Altitude média do curso d'água principal (m)	$Améd = \frac{Amáx + Amin}{2}$	-	-
ΔH - Amplitude altimétrica do curso d'água principal (m)	$A_{\Delta H} = A_{máx} - A_{min}$	Sendo: Amáx = altitude máxima e Amín = altitude mínima	Diferença altimétrica entre o ponto mais baixo e mais alto da bacia
S - Declividade do curso d'água principal (m/m)	$S = \frac{\Delta H}{C_p}$	Sendo: S = declividade; ΔH = amplitude altimétrica e Cp = comprimento do curso d'água principal	Diretamente associado ao tempo de escoamento superficial de uma bacia. Também é referido como relação de relevo
Tt - Textura topográfica	$logTt = 0,219649 + 1,115 log Dd$	Sendo: Dd = densidade de drenagem	-

Fonte: Autoria própria (2024).

A amplitude altimétrica, definida como a diferença entre a altitude máxima e mínima na região, foi obtida utilizando o complemento Profile Tool do QGIS 3.34, que gera perfis de elevação topográfica a partir de camadas rasterizadas de segmentos de fluxos.

Para cada uma das três delimitações foi calculado o valor de declividade ao longo do curso d'água principal e produzidos os respectivos mapas de declividade no software QGIS 3.34. Utilizando os modelos digitais de elevação como dados de entrada, o processo para a produção dos mapas de declividade envolveu os seguintes passos no QGIS 3.34: abertura da guia *Raster > Análise > Declividade... > Declividade expressa em porcentagem > Extrair*.

Além disso, a topografia foi categorizada em cinco classes: plano (0 a 3%), suave ondulado (3 a 8%), ondulado (8 a 20%), forte ondulado (20 a 45%) e montanhoso (45 a 75%), conforme a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979). Por fim, o cálculo da textura topográfica foi realizado expressando-se o perímetro em quilômetros.

4.3.5.3 Características da rede de drenagem

As fórmulas para obtenção dos parâmetros morfométricos da rede de drenagem (Quadro 3) foram baseados em: Christofolletti (1980) - densidade de drenagem e densidade hidrográfica; Kirpich (1940) - tempo de concentração; Tucci (2007) - intensidade da chuva e Rocha (2023) - vazão máxima pelo método racional corrigido.

Quadro 3 - Características do relevo de bacias hidrográficas, fórmulas, legenda e comentário

Parâmetro morfométrico	Fórmula	Legenda	Comentário
Cp - Comprimento do curso d'água principal (m)	-	Obtido através do software QGIS 3.34	Uso da ferramenta "Identificar Feições"
Ct - Comprimento total dos cursos d'água (m)	-	Obtido através do software QGIS 3.34	Por haver apenas um canal dentro da área da microbacia, Ct = Cp
Dd - Densidade de drenagem (km/km²)	$Dd = \frac{Lc}{At}$	Sendo: Ct = comprimento total dos canais e At = área de drenagem	Comprimento médio da bacia por unidade de área
Dh - Densidade hidrográfica (canais/km²)	$Dh = \frac{N}{At}$	Sendo: N = número de canais de 1º ordem e At = área de drenagem	Expressa a capacidade que a bacia tem de gerar novos cursos
tc - Tempo de concentração (min)	$tc = 57 * \left(\frac{Lc^3}{\Delta H}\right)^{0,385}$	Sendo: Cp = comprimento do curso de água principal em quilômetros e ΔH = amplitude altimétrica em metros	Parâmetro útil para analisar o tempo de resposta de uma bacia a um evento pluviométrico
i - Intensidade da chuva (mm/h)	$i = \frac{a * TR^b}{(tc + c)^d}$	Sendo: TR = tempo de retorno; tc = tempo de concentração e "a", "b", "c" e "d" constantes de ajustes locais da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF)	-
Q - Vazão escoada total (m³/s)	$Q = 0,278 * C * I * A_t * n$	Sendo: C = coeficiente de perdas variando de acordo com o tipo de ocupação da área; I = intensidade da chuva expressa em mm/h; At = área total de drenagem e n = coeficiente de distribuição	$n = A_t^{-0,1}$, para áreas rurais e $n = A_t^{-0,15}$, para áreas urbanas, com o valor expresso em hectares

Fonte: Autoria própria (2024).

Os comprimentos dos cursos de água, tanto principais quanto totais, foram determinados utilizando a ferramenta "Identificar Feições", disponível no QGIS 3.34 para camadas vetoriais. Essa análise foi realizada após os recortes feitos na camada *shapefile* de trechos de drenagem a nível nacional do IBGE (2023).

Para esta pesquisa, há apenas um curso d'água presente na área de estudo, logo o valor numérico para o número de cursos d'água - correspondente ao número de canais de 1º ordem - é igual a unidade.

Os tempos de concentração para cada delimitação foram calculados com base na equação de Kirpich (1940), recomendada para bacias hidrográficas de pequena escala, como a microbacia desse estudo, e que fornece o resultado em minutos. Também, os tempos de retorno considerados foram de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 50, 60, 75, 90 e 100 anos.

Quanto ao município de Mossoró - RN, os parâmetros da curva IDF adotados são 2540,4 (a), 0,2757 (b), 39 (c) e 0,9414 (d) (CPRM, 2014). A determinação da intensidade da chuva é crucial para obter os valores de vazão máxima para cada tempo de retorno.

Além disso, no cálculo da vazão máxima pelo método Racional corrigido, realizou-se uma adaptação na fórmula para contemplar a variação do coeficiente de deflúvio conforme a configuração da área superficial de estudo, que possui áreas residenciais com poucas superfícies livres e vegetação natural.

Logo, a equação da vazão máxima utilizada nesta pesquisa resume-se à soma da vazão máxima pelo método Racional corrigido (Rocha, 2023) para áreas urbanizadas e não urbanizadas da área de estudo (Equação 03).

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{área urbanizada}} + Q_{\text{área não-urbanizada}} \quad (03)$$

Por fim, para os coeficientes de deflúvio das áreas urbanizadas e não urbanizadas foram considerados os valores de 0,65 e 0,20, para o valor médio de edificações não muito densas (Quadro 4) e para topografia arborizada (Quadro 5), respectivamente.

Quadro 4 - Valores do coeficiente de deflúvio (C) adotados pela Prefeitura São Paulo

Zonas	“C”
Edificação muito densa: Partes centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 - 0,95
Edificação não muito densa: Partes adjacente ao centro, de menos densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 - 0,70
Edificações com poucas superfícies livres: Partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas	0,50 - 0,60
Edificações com muitas superfícies livres: Partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,25 - 0,50
Subúrbios com alguma edificação: Partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção	0,10 - 0,25
Matas, parques e campos de esportes: Partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação	0,05 - 0,20

Fonte: Wilken (1978).

Quadro 5 - Valores do do coeficiente de deflúvio (C) para áreas rurais

Tipo de área	“C”
TOPOGRAFIA	
Terreno plano, declividade de 0,2 – 0,6 m/km	0,30
Terreno, declividade de 3- 4 m/km	0,20
Morros, declividade de 50 a 50 m/km	0,10
SOLO	
Argila impermeável	0,10
Permeabilidade média	0,20
Arenoso	0,40
COBERTURA	
Áreas cultivadas	0,10
Árvores	0,20

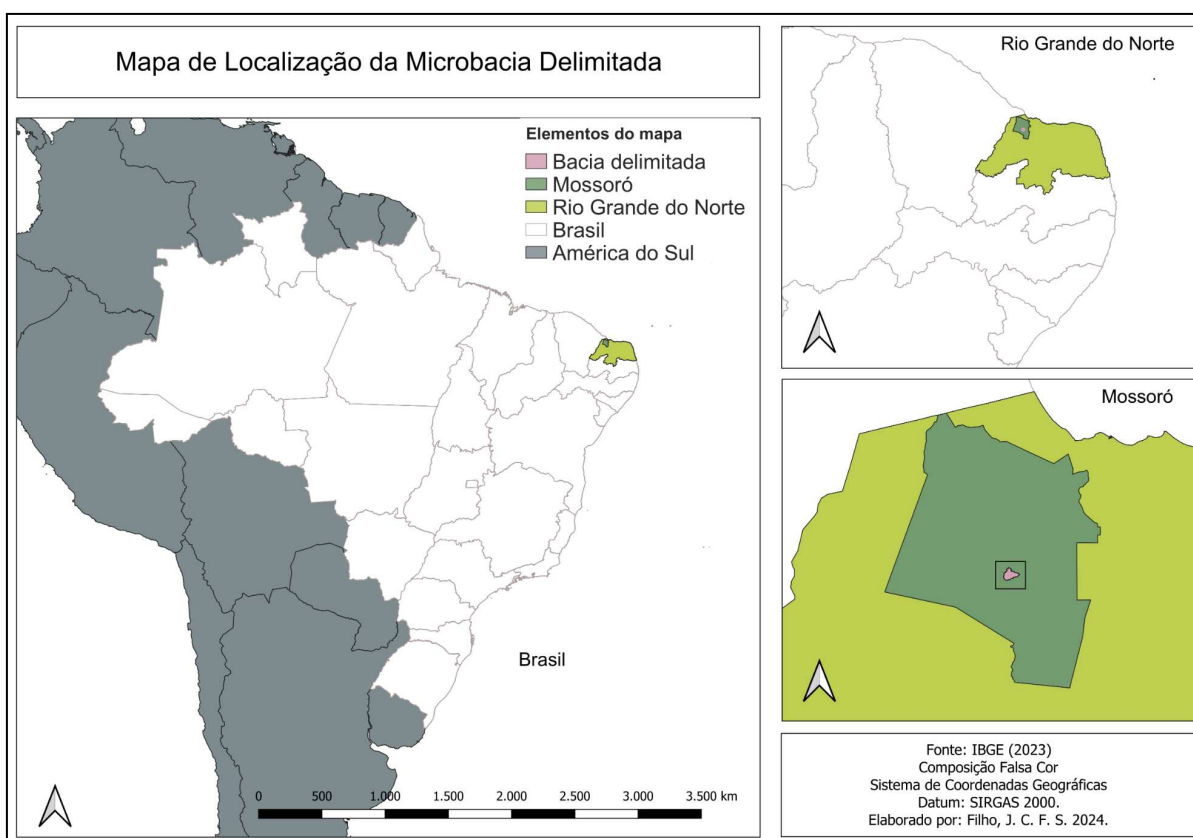
Fonte: Tucci (2007).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Delimitação da microbacia de drenagem urbana

A análise visual das delimitações de microbacia provenientes dos três MDE é uma etapa importante para compreender a influência da resolução espacial na precisão desses resultados. Na Figura 23 é apresentada a localização da área de estudo que foi produzida para simplificar a compreensão geográfica do posicionamento das delimitações obtidas.

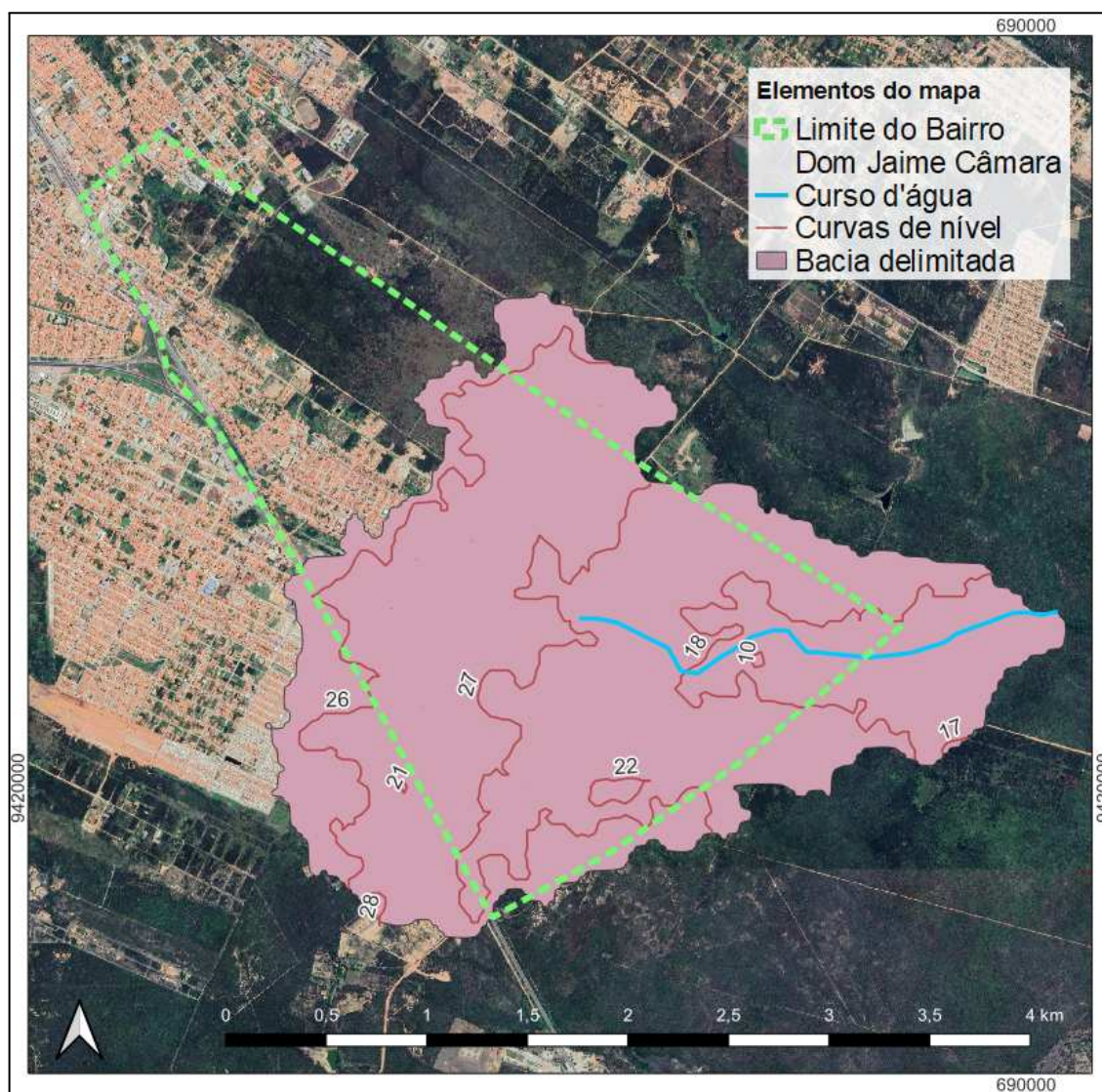
Figura 23 - Mapa de localização da área de estudo após as delimitações realizadas,
Mossoró - RN



Fonte: Autoria própria (2024).

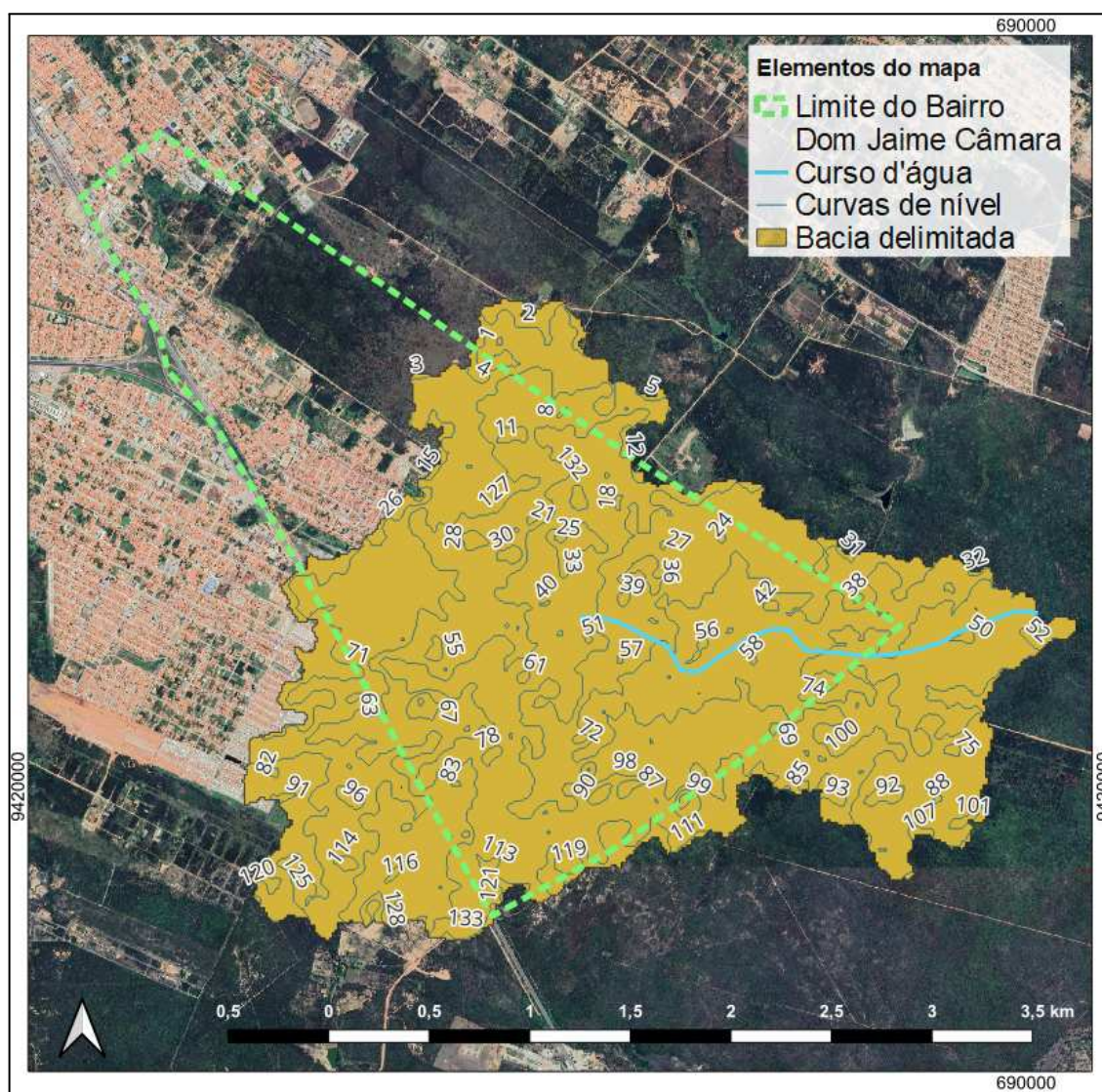
Nas Figuras 24 a 26 estão apresentadas as delimitações obtidas para a microbacia de drenagem urbana deste estudo, utilizando cada um dos três modelos digitais de elevação. Adicionalmente, a representação visual do limite do bairro Dom Jaime Câmara foi incluída nessas figuras para oferecer um contexto geoespacial. Essa adição facilita a compreensão espacial das delimitações da microbacia em relação às divisões administrativas locais.

Figura 24 - Mapa de localização da microbacia delimitada neste estudo, localizada em Mossoró - RN, com modelo digital de elevação com resolução espacial de 30 metros



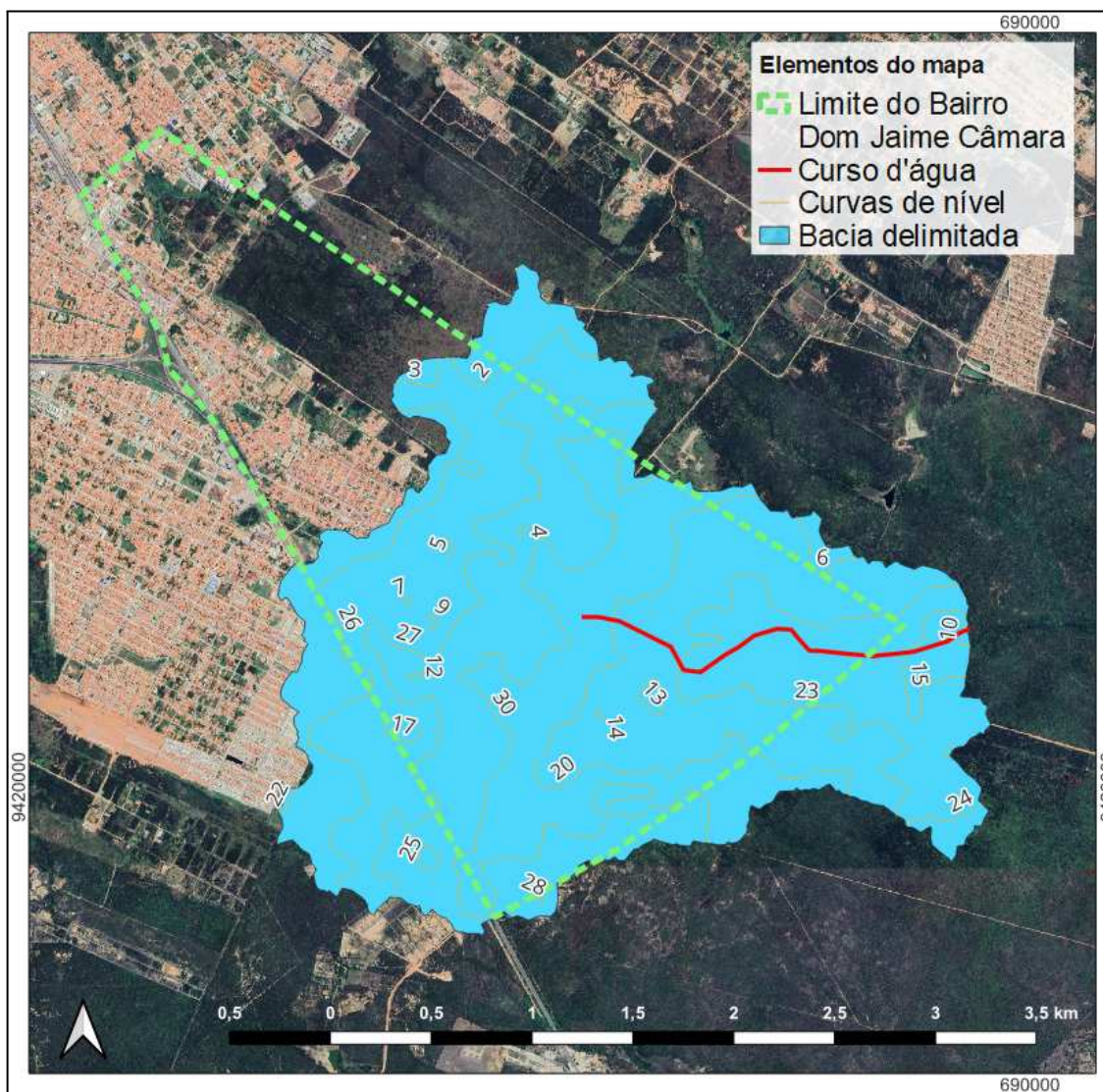
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 25 - Mapa de localização da microbacia delimitada neste estudo, localizada em Mossoró - RN, com modelo digital de elevação com resolução espacial de 12,5 metros



Fonte: Autoria própria (2024).

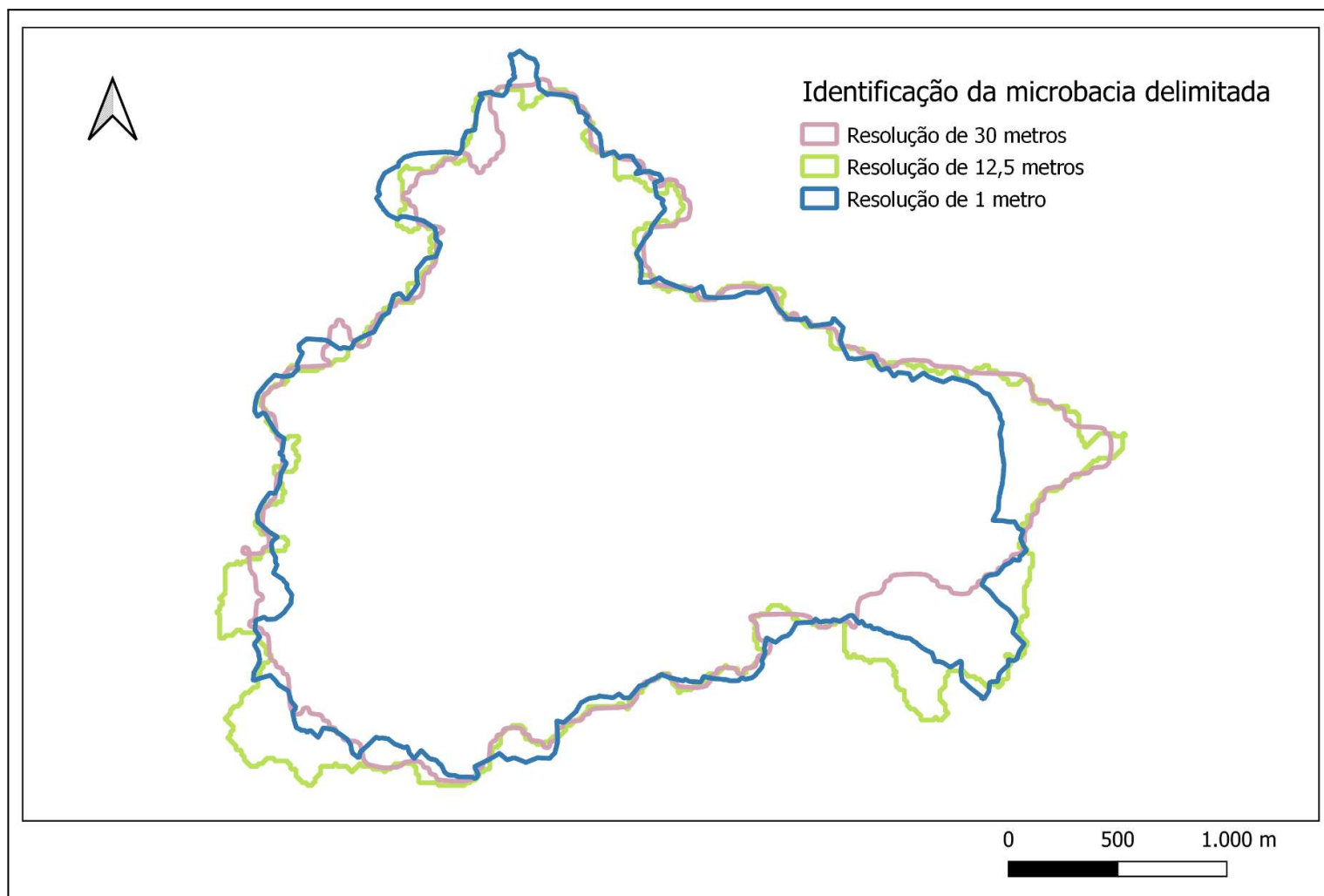
Figura 26 - Mapa de localização da microbacia delimitada neste estudo, localizada em Mossoró - RN, com modelo digital de elevação com resolução espacial de 1 metro (reamostrado)



Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando visualmente as delimitações da microbacia estudada, obtidas a partir dos três modelos digitais de elevação, é possível observar uma tendência de similaridade nos formatos das áreas delimitadas. Essa tendência é mais evidente na Figura 27, onde os perímetros das delimitações estão sobrepostos. A consistência nos formatos sugere uma coerência nas características morfométricas da microbacia, mesmo considerando diferentes resoluções de imagem (30, 12,5 e 1 metro e sendo o último produzido por reamostragem).

Figura 27 - Comparação por sobreposição dos limites da microbacia de drenagem urbana delimitada neste estudo, a partir de modelos digitais de elevação de diferentes resoluções



Fonte: Autoria própria (2024).

Ainda sobre a Figura 27, é relevante destacar que a delimitação gerada a partir do MDE de 1 metro (reamostrado) é que exhibe as maiores diferenças na tendência de formato em relação às demais, embora não sejam significativas. A próxima seção 5.2 abordará a validação dessas observações por meio de pontos de controle, contribuindo para uma análise mais aprofundada da precisão das delimitações obtidas.

5.2 Pontos de controle

Para proporcionar melhor organização e compreensão dos dados, as altitudes nas coordenadas para os três modelos digitais de elevação com diferentes resoluções, nos quais foram coletados os 66 pontos altimétricos (incluindo a base) com o equipamento RTK, foram anexadas no Apêndice A.

No Apêndice A, os dados incluem a altitude tanto para os pontos de controle quanto para os três MDE considerados: 30, 12,5 e 1 metro (reamostrado) de resolução espacial, além da média das altitudes do conjunto de dados.

A partir das informações apresentadas no Apêndice A, foi possível conduzir a comparação estatística pela soma das diferenças, ou distâncias. Como já comentado na seção metodológica 4.2.3, esse procedimento visa determinar qual das resoluções se aproxima mais dos pontos de controle, isto é, qual dos modelos melhor reflete a realidade do terreno.

Esses fatores destacam a importância da análise estatística a partir dos pontos de controle. Além disso, outro ponto relevante é validar a metodologia sistematizada nesta pesquisa para a produção de modelos digitais de elevação com alta resolução espacial a partir de dados reamostrados, sem a necessidade de depender de programas espaciais que demandem novos envios de satélites, radares ou drones para a produção de modelos digitais, mas apenas da manipulação virtual de dados já disponíveis.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre a soma das diferenças obtidas para as altitudes em comparação aos pontos de controle e os diferentes modelos digitais de elevação.

Tabela 1 - Resultados das somas das diferenças para as altitudes apresentadas no Apêndice A

Variável	Diferença em relação aos pontos de controle (m)
MDE 30 m	651,25
MDE 12,5 m	200,64
MDE 1 m	650,38

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir dos resultados da Tabela 01, foi possível concluir que o modelo mais exato em representar a microbacia é o modelo com resolução espacial de 12,5 metros, pois esse é o modelo que obteve o menor valor numérico para a soma das diferenças (200,64) em comparação com os demais.

Por outro lado, os valores obtidos para as somas das diferenças dos outros modelos (30 metros e 1 metro reamostrado) são muito próximos entre si, apontando a usabilidade do método de reamostragem para a produção do modelo com altas resoluções como alternativa para o uso dos modelos com resoluções de 30 metros ou menores, como o modelo de 1 metro de resolução produzido por reamostragem para esta pesquisa.

A aplicação do método para a produção do MDE com alta resolução de 1 metro, obtido por meio da interpolação de dados reamostrados de um modelo com baixa resolução (SRTM - 90 m), pode ser vantajosa em cenários onde se busca uma delimitação que resulte em arquivos digitais mais leves e uma representação mais suave e acessível.

Sabe-se que adquirir modelos de elevação *on-line* com resoluções equivalentes entre os dados altimétricos pode não ser tão simples e intuitivo. Contudo, para o exemplo desta pesquisa, o modelo reamostrado não substitui o modelo com resolução maior do Alos Palsar, que é mais preciso e exato.

5.3 Características morfométricas da microbacia de estudo

Os resultados das características geométricas, de relevo e de rede de drenagem da microbacia estão sintetizados na Tabela 2, que compara as delimitações nas resoluções de 30, 12,5 e 1 m, à exceção dos resultados para intensidade da chuva e vazões totais, que serão abordados nos itens 5.3.3 e 5.3.4, respectivamente. Além dos valores numéricos das métricas, a Tabela 2 inclui uma coluna com os coeficientes de variação, indicando a dispersão dos dados.

Tabela 2 - Comparação das características morfométricas da microbacia em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE)

Parâmetro morfométrico	MDE de 30 metros	MDE de 12,5 metros	MDE de 1 metro (reamostrado)	Coefficiente de Variação
At	6,58 km ²	7,14 km ²	6,65 km ²	4,60%
Au	1,79 km ²	1,83 km ²	1,70 km ²	3,80%
Ar	4,79 km ²	5,31 km ²	4,95 km ²	5,36%
P	17,46 km	21,68 km	15,68 km	17,64%
L	4,03 km	4,31 km	3,55 km	9,45%
Kc	1,91	2,27	1,70	15,12%
Kf	0,4	0,39	0,53	18,92%
Ic	0,27	0,19	0,34	27,43%
Rea	0,72	0,7	0,82	8,91%
Amáx	39,30 m	31,24 m	38,35 m	11,49%
Amin	21,05 m	15,08 m	22,58 m	18,83%
Améd	30,18 m	23,16 m	30,47 m	13,71%
ΔH	18,25 m	16,16 m	15,77 m	8,25%
S	0,007 m/m	0,006 m/m	0,007 m/m	6,70%
Tt	0,59	0,52	0,47	11,98%
Cp	2,62 km	2,52 km	2,14 km	9,88%
Ct	2,62 km	2,52 km	2,14 km	9,88%
Dd	0,40 km/km ²	0,35 km/km ²	0,32 km/km ²	10,71%
Dh	0,15 canais/km ²	0,14 canais/km ²	0,15 canais/km ²	4,31%
tc	56,59 min	56,66 min	47,57 min	9,24%

At: área total de drenagem; Au: área urbanizada; Ar: área não-urbanizada; P: perímetro total; L: máximo comprimento da bacia a partir do ponto de exutório; Kc: coeficiente de compactidade; Kf: fator de forma; Ic: índice de circularidade; Rea: razão de alongação; Amáx: altitude máxima do curso d'água principal; Amin: altitude mínima do curso d'água principal; Améd: altitude média do curso d'água principal; ΔH : amplitude altimétrica do curso d'água principal; S: declividade do curso d'água principal; Tt: textura topográfica; Cp: comprimento do curso d'água principal; Ct: comprimento total dos cursos d'água; Dd: densidade de drenagem; Dh: densidade hidrográfica e tc: tempo de concentração

Fonte: Autoria própria (2024).

É importante destacar que nos parâmetros morfométricos apresentados na Tabela 2, os valores numéricos para esses parâmetros nos modelos com resolução espacial de 30 metros e 1 metro (resultante de reamostragem) são bastante semelhantes. Isso ocorre porque a base de dados usada para a reamostragem e produção do modelo de 1 metro de resolução espacial é a mesma utilizada para o modelo digital de 30 metros, sendo ambas as bases produtos do projeto espacial SRTM. Ademais, nos itens 5.3.1 ao 5.3.8 serão analisados os parâmetros listados na Tabela 2 de forma mais detalhada.

5.3.1 Área, perímetro e comprimento máximo a partir do exutório

É possível observar uma relativa estabilidade nos valores do parâmetro “área total” (At), “máximo comprimento da bacia a partir do ponto de exutório” (L) e “área não-urbanizada” (Ar) entre os três MDE, com o modelo de 12,5 metros de resolução espacial apresentando os valores numéricos mais discrepantes, embora essas diferenças sejam mínimas. Este padrão sugere que, embora haja uma coerência geral, pequenas variações na forma da bacia hidrográfica podem ser mais perceptíveis em resoluções diferentes. Além disso, o parâmetro de “área urbanizada” (Au) é o que apresenta menor variação entre todos os parâmetros analisados, com o coeficiente de variação igual à apenas 3,80%

No entanto, é importante ressaltar que as variações observadas para os parâmetros “área urbanizada”, “áreas não-urbanizadas” e “máximo comprimento a partir do exutório” podem ser resultado do processo de recorte pela delimitação da área total, não necessariamente indicando maior ou menor precisão da delimitação para cada modelo digital de elevação.

Ademais, o “perímetro total” (P) da microbacia expande à medida que a resolução espacial do MDE diminui. Esse aumento sugere uma maior complexidade na delimitação da linha de perímetro em resoluções mais altas (menor pixel), indicando que a forma detalhada da microbacia torna-se mais evidente em resoluções mais finas.

Os coeficientes de variação para cada parâmetro apresentam consistência nos dados, com todos os valores abaixo de 20%. No entanto, o “perímetro total” apresentou um coeficiente de variação mais alto (17,64%) que os demais, indicando uma maior variabilidade nos dados desta métrica em comparação com as outras. Essa variabilidade pode ser atribuída à complexidade na delimitação da linha de perímetro, especialmente em resoluções mais altas.

5.3.2 Configurações geométricas

Os parâmetros relativos às configurações geométricas da microbacia estudada nesta pesquisa foram sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às configurações geométricas em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa

Parâmetro morfométrico	MDE de 30 metros	MDE de 12,5 metros	MDE de 1 metro (reamostrado)	Coefficiente de variação
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,91	2,27	1,70	15,12%
Fator de forma (Kf)	0,4	0,39	0,53	18,92%
Índice de circularidade (Ic)	0,27	0,19	0,34	27,43%
Razão de alongação (Rea)	0,72	0,7	0,82	8,91%

Fonte: Autoria própria (2024).

O coeficiente de compacidade (Kc) ou também coeficiente de Gravelius (1914), que representa a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo com área equivalente, apresentou, quando comparados os valores obtidos dos modelos de menor resolução com o modelo de alta resolução espacial: 1,92 e 2,27 contra 1,70, para 30 e 12,5 metro contra 1 metro (reamostrado), respectivamente; um decréscimo à medida que a resolução do modelo digital aumentou.

Este coeficiente indica que à medida que se aproxima da unidade, a bacia tende a ser mais circular, aumentando a propensão a enchentes (Quadro 6) e reduzindo o tempo de concentração.

Quadro 6 - Interpretação do coeficiente de compacidade (Kc)

Valor de Kc	Interpretação
1,00 a 1,25	Bacia com alta propensão a grandes enchentes
1,25 a 1,50	Bacia com tendência mediana a grandes enchentes
> 1,50	Bacia não sujeita a grandes enchentes

Fonte: Oliveira *et al.*, (2012); adaptado por Back (2014).

Com base nos coeficientes de compacidade obtidos para as três delimitações da microbacia (1,91; 2,27 e 1,70 para 30, 12,5 e 1 metro, respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem), e pelos dados apresentados na Tabela 1, conclui-se que a microbacia demonstra uma menor suscetibilidade a grandes enchentes, sugerindo também uma forma menos circular.

Ademais, o fator de forma (Kf), também conhecido como coeficiente de forma, estabelece uma correlação entre o formato da bacia e o de um retângulo, sendo calculado pela relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Esse coeficiente varia de zero a

um, onde valores próximos de zero indicam bacias mais alongadas, enquanto valores mais próximos de um representam bacias mais circulares.

Bacias com fatores de forma mais elevados tendem a apresentar maior propensão a enchentes, conforme apresentado no Quadro 7, e um tempo de concentração menor.

Quadro 7 - Interpretação do fator de forma ou coeficiente de forma

Valor de Kf	Interpretação
1,00 a 0,75	Bacia sujeita a enchente
0,75 a 0,50	Bacia com tendência mediana a enchentes
< 0,50	Bacia não sujeita a enchentes

Fonte: Back (2014).

Com base nos coeficientes de forma calculados para as três resoluções de MDE distintas - 0,40, 0,39 e 0,53 para 30, 12,5 e 1 metro (reamostrado) - e considerando os dados fornecidos na Tabela 2, pode-se inferir que a microbacia apresenta diferentes níveis de suscetibilidade a enchentes em cada modelo. Enquanto os modelos de 30 e 12,5 metros de resolução espacial indicam uma menor propensão a enchentes, o modelo de 1 metro (reamostrado) sugere uma tendência mediana.

O índice de circularidade (I_c) expressa a relação entre a área da bacia e a área de um círculo com o mesmo perímetro, variando de 0 a 1, sendo 1 indicativo de uma bacia circular. Para as resoluções de 30 e 12,5 metros, os valores obtidos para I_c foram 0,27 e 0,19, respectivamente, enquanto que para a resolução espacial de 1 metro (reamostrado) o valor obtido foi de 0,34. Esses resultados sugerem que a forma da bacia tende a ser menos circular em todas as resoluções do MDE, com uma configuração mais alongada ou irregular em comparação com a idealização de um círculo.

A Razão de alongação (Rea) é semelhante ao índice de circularidade, mas calculada de forma ligeiramente diferente. Para as resoluções de 30 e 12,5 metros, os valores obtidos para o Rea foram 0,72 e 0,70, respectivamente, enquanto que para a resolução de 1 metro (reamostrado) o valor obtido foi de 0,82. Apesar dos valores obtidos de Rea indicarem uma forma mais circular para a bacia, em contraste com os valores de I_c , a tendência de uma forma menos circular e mais alongada para a bacia ainda é mantida para os outros parâmetros geométricos em todas as resoluções do MDE.

Quanto aos coeficientes de variação obtidos, verifica-se uma dispersão significativa para todos os parâmetros analisados. Enquanto a razão de alongação apresenta uma variação

relativamente baixa dos dados, com 8,18%, tanto o coeficiente de compacidade (15,12%) quanto o fator de forma (18,92%) revelam uma variação média. Por outro lado, o índice de circularidade destaca-se com uma alta variação de 27,43%. Essa variação nos dados reflete a complexidade das delimitações obtidas para a área de estudo, evidenciando a sensibilidade dos parâmetros às características geométricas do terreno.

Portanto, com base nos parâmetros morfométricos analisados - coeficiente de compacidade (K_c), coeficiente de forma (K_f), índice de circularidade (I_c) e razão de alongação (Re_a) - é possível verificar uma coerência nos resultados obtidos para as diferentes resoluções de MDE quanto ao formato da microbacia de estudo. Os valores desses parâmetros indicam uma microbacia com formas não circulares e mais alongadas, sugerindo uma menor probabilidade de precipitações intensas abrangerem simultaneamente toda a sua extensão. Isso implica em uma chance menor de múltiplos tributários contribuírem concomitantemente para o exutório, mitigando o risco de transbordamento dos canais da região.

Entretanto, analisar apenas esses parâmetros morfométricos de uma microbacia é uma abordagem limitada para compreender completamente sua dinâmica hidrológica e a susceptibilidade a eventos extremos, como enchentes. Embora os coeficientes de compacidade (K_c), fator de forma (K_f), índice de circularidade (I_c) e razão de alongação (Re_a) forneçam *insights* importantes sobre a forma da bacia e suas possíveis consequências hidrológicas, eles não consideram nuances específicas da topografia local.

Por exemplo, a análise do hidrograma unitário (HU), apresentado por Sherman (1932), oferece uma maior compreensão quanto à resposta temporal da bacia às chuvas, à identificação de padrões de escoamento e riscos de inundação, ao planejamento de infraestrutura hidráulica, à previsão de vazões de projeto e ao monitoramento da qualidade da água. Para Sule (2013) o hidrograma unitário é uma ferramenta hidrológica essencial para prever os picos de vazão de inundação e determinar a resposta de escoamento direto à precipitação.

A abordagem do HU vai além da simples caracterização morfométrica da bacia, entretanto, para essa análise, faz-se necessário um conjunto de dados históricos do índice pluviométrico da área de estudo.

Conclui-se que esses resultados ressaltam a importância da compreensão da forma geométrica específica da microbacia para uma gestão eficaz dos recursos hídricos locais, contribuindo para uma abordagem mais abrangente e eficaz na administração desses recursos.

5.3.3 Altitude máxima, mínima, média e amplitude altimétrica

Os parâmetros relativos à altitude máxima, mínima, média e amplitude altimétrica da microbacia estudada nesta pesquisa foram sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às altitudes máximas e mínimas em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa

Parâmetro morfométrico	MDE de 30 metros	MDE de 12,5 metros	MDE de 1 metro (reamostrado)	Coefficient e de variação
Altitude máxima do curso d'água principal (Amáx)	39,30 m	31,24 m	38,35 m	11,49%
Altitude mínima do curso d'água principal (Amín)	21,05 m	15,08 m	22,58 m	18,83%
Altitude média do curso d'água principal (Améd)	30,18 m	23,16 m	30,47 m	13,71%
Amplitude altimétrica do curso d'água principal (ΔH)	18,25 m	16,16 m	15,77 m	8,25%

Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com Teodoro (2007), a variação de altitude na bacia exerce influência na precipitação e no deflúvio médio. Diferenças altimétricas notáveis impactam não apenas a temperatura média, mas também a variação anual da precipitação.

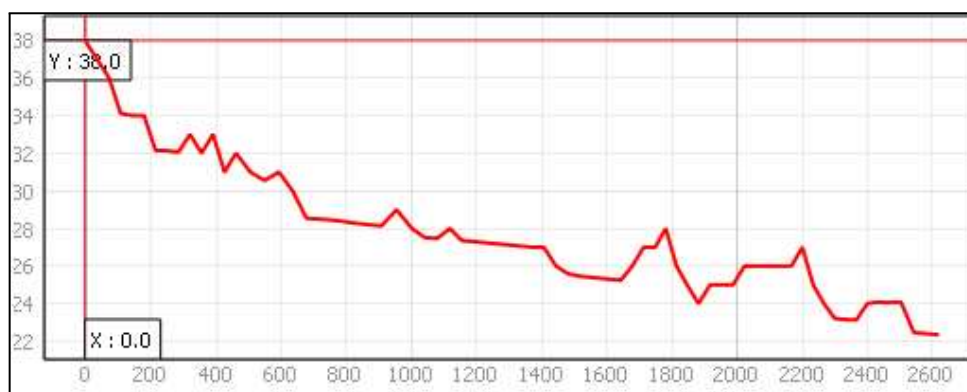
Ademais, nesta pesquisa, foi observada uma variação média do coeficiente de variação (13,71%) para a altitude média do curso d'água principal da microbacia a qual engloba o bairro Dom Jaime Câmara, nas três resoluções propostas.

Pode-se notar que os valores de altitude média obtidos (30,18; 23,16 e 30,47 metros para 30, 12,5 e 1 metro (reamostrado), respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem) para a área de estudo excedem consideravelmente, quase dobrando, em comparação com a altitude média da sede do município de Mossoró, que é de 16 metros (Araújo, 2007), com exceção do MDE de 12,5 metros.

Também, o parâmetro de amplitude altimétrica obteve a menor dispersão dos dados em comparação com os demais parâmetros (8,25%). Os valores obtidos (18,25, 16,16 e 15,77 metros para 30, 12,5 e 1 metro (reamostrado) de resolução espacial do MDE) já indicam uma variação moderada do relevo, com pequenas elevações e declives na área de estudo.

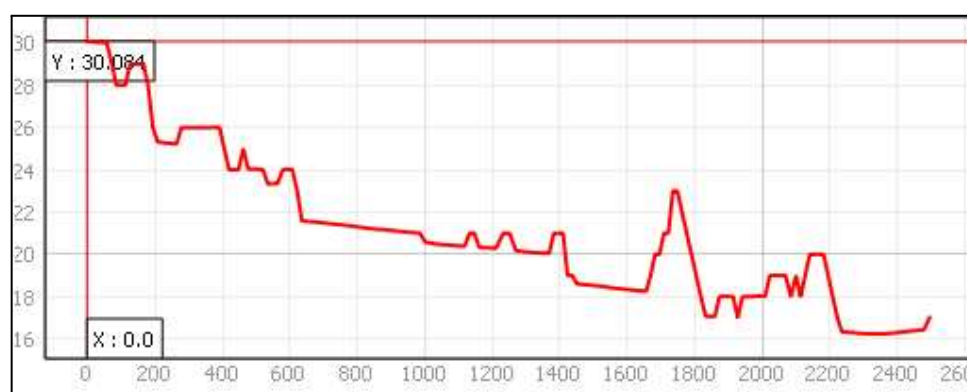
Nas Figuras 28 a 30 são apresentados os perfis de elevação lateral do curso d'água principal para as resoluções de 30, 12,5 e 1 metro (reamostrado), respectivamente, obtidos a partir do complemento *Profile Tool* do QGIS 3.34.

Figura 28 - Perfil de elevação do curso d'água principal para a resolução espacial de 30 metros do modelo digital de elevação para a microbacia estudada



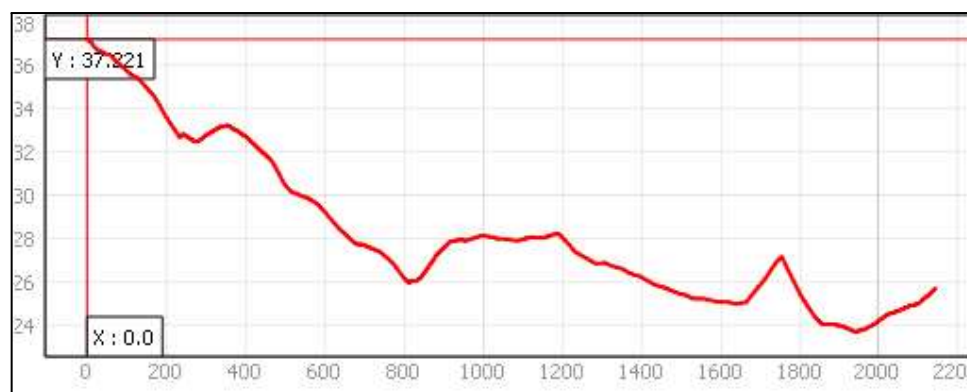
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 29 - Perfil de elevação do curso d'água principal para a resolução espacial de 12,5 metros do modelo digital de elevação para a microbacia estudada



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 30 - Perfil de elevação do curso d'água principal para a resolução espacial de 1 metro (reamostrado) do modelo digital de elevação para a microbacia estudada



Fonte: Autoria própria (2024).

Observa-se, por meio das Figuras 28 a 30, que o ponto de exutório não corresponde à menor altitude em nenhum dos três casos, sugerindo a possibilidade de menores erros nos três modelos de elevação. Porém, ainda assim, a tendência dos perfis é de escoamento em direção ao ponto de exutório.

Por fim, percebe-se também que o perfil de elevação do modelo com resolução espacial de 1 metro (reamostrado) apresentou curvas mais suaves.

5.3.4 Declividade, mapas de declividade e textura topográfica

Os parâmetros relativos à declividade, mapas de declividade e textura topográfica da microbacia estudada nesta pesquisa foram sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às declividades e texturas topográficas em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada

Parâmetro morfométrico	MDE de 30 metros	MDE de 12,5 metros	MDE de 1 metro (reamostrado)	Coefficiente de variação
Declividade (S)	0,007 m/m	0,006 m/m	0,007 m/m	6,70%
Textura topográfica (Tt)	0,59	0,52	0,47	11,98%

Fonte: Autoria própria (2024).

A inclinação do terreno tem um impacto direto na velocidade do escoamento superficial, influenciando os picos de enchente, a infiltração e a suscetibilidade à erosão na bacia (Villela e Mattos, 1975). Conforme Leal (2019), à medida que a inclinação do terreno aumenta, observa-se uma tendência crescente de perda de solo por erosão, devido à intensificação do escoamento das águas e à redução do tempo disponível para a infiltração no solo.

Os valores obtidos para a declividade, também conhecida como relação de relevo, nos três modelos de elevação (0,007 m/m, 0,006 m/m e 0,007 m/m para 30, 12,5 e 1 metro de resolução, respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem), indicam que a microbacia possui uma baixa relação de relevo entre seus componentes horizontais e verticais, sendo mais alongada e com baixa amplitude altimétrica. Além disso, o coeficiente de variação obtido para a declividade (6,70%) sugere uma baixa dispersão dos dados, mesmo com a utilização de três resoluções de MDE diferentes.

Outro aspecto relevante, além do cálculo da declividade, é a classificação do relevo por meio da produção de mapas de declividade. Segundo Leal (2019), esses mapas fornecem uma representação detalhada do relevo, revelando a inclinação das vertentes e outros aspectos relacionados à sua morfologia. Quando combinados com o MDE, fornecem ao poder público uma visão precisa, possibilitando análises sobre o uso do solo e o planejamento da ocupação com base nessas informações.

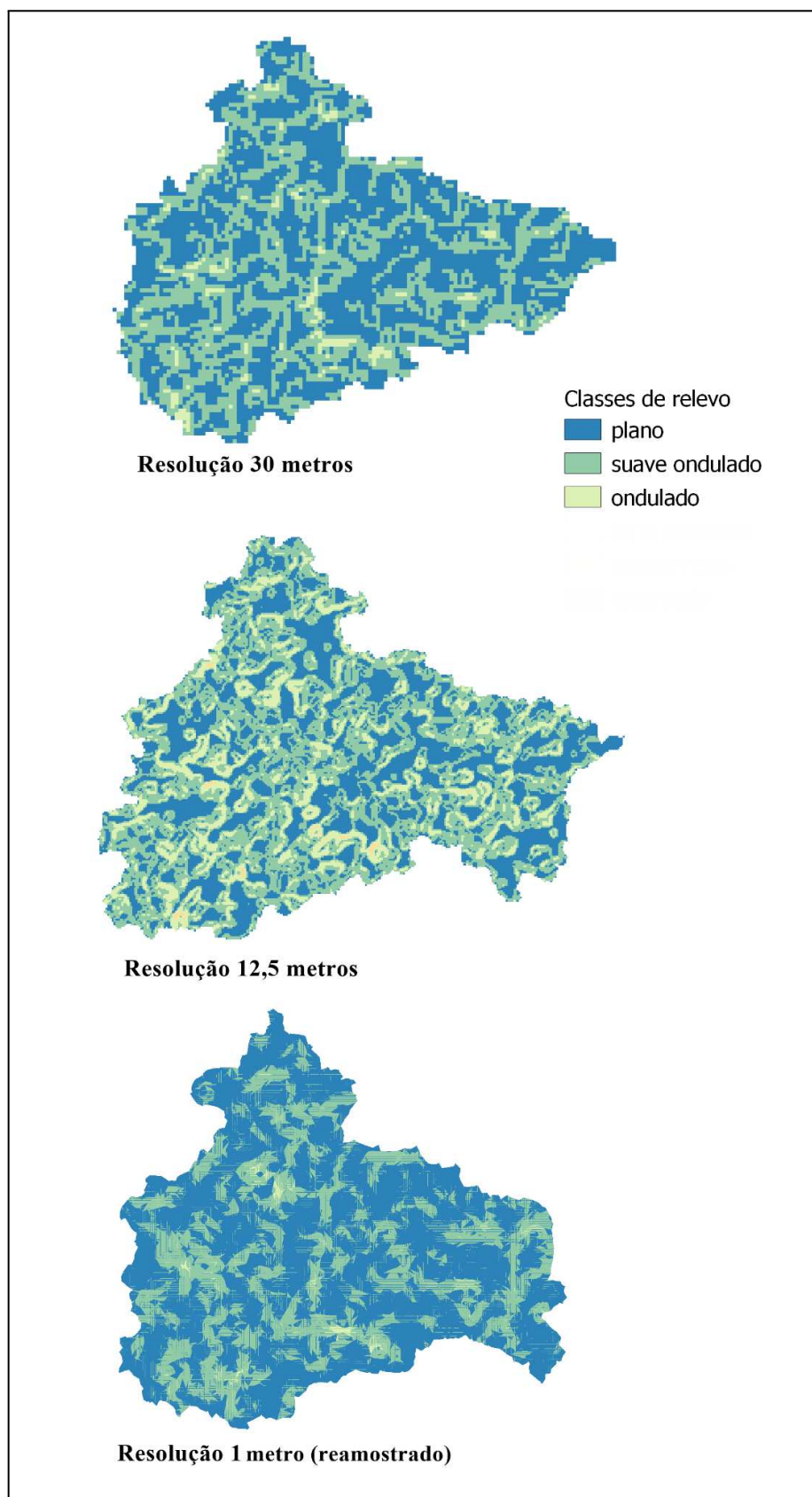
Nessa perspectiva, o Quadro 8 apresenta as classificações de relevo e suas descrições correspondentes. Posteriormente, na Figura 31, são exibidos os mapas de declividade resultantes das três delimitações, os quais foram gerados utilizando o *software* QGIS 3.34.

Quadro 8 - Distribuição absoluta e relativa das classes de relevo

Classe de relevo	Classe de declividade	Descrição
Plano	(0 a 3%)	Superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos.
Suave ondulado	(3 a 8%)	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto e/ou outeiros apresentando declividade suave.
Ondulado	(8 a 20%)	Superfície de topografia pouco movimentada, formada por conjunto de colinas e/ou outeiros.
Forte ondulado	(20 a 45%)	Superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros com elevações de 100 a 200 m de altitude relativa.
Montanhoso	(45 a 75%)	Superfície de topografia vigorosa, com predominância de formas acidentadas, usualmente constituída por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos.
Escarpado	(> 75%)	Regiões ou áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo escapamentos com declividade muito forte.

Fonte: Embrapa (1979); adaptado por Costa (2023).

Figura 31 - Mapas de declividade das delimitações da microbacia estudada nesta pesquisa com resoluções de 30; 12,5 e 1 metro (reamostrado), respectivamente



Fonte: Autoria própria (2024).

Além da produção dos mapas de declividade, também foi realizada a extração dos valores numéricos referentes às áreas de ocupação de cada classe de relevo desses mapas, por modelo digital de elevação (Tabela 6).

Tabela 6 - Declividade da microbacia estudada nesta pesquisa em três modelos digitais de elevação (MDE) com resoluções espaciais diferentes, a partir do mapa de declividade produzido no *software* QGIS 3.34

Classe de relevo	MDE 30 metros		MDE 12,5 metros		MDE 1 metro (reamostrado)	
	Área (km ²)	Ocupação da área (%)	Área (km ²)	Ocupação da área (%)	Área (km ²)	Ocupação da área (%)
Plano	3,53	53,7	2,68	37,47	4,37	65,7
Suave ondulado	2,84	43,14	3,27	45,84	2,22	33,43
Ondulado	0,21	3,18	1,17	16,41	0,06	0,87
Forte ondulado	-	-	0,02	0,28	-	-
Total	6,58	100,01	7,14	100	6,65	100

Fonte: Autoria própria (2024).

Com base na Tabela 6, é evidente que o relevo plano predomina nos modelos de elevação com resolução espacial de 30 e 1 metro (reamostrado), ocupando 53,70% e 65,70% da área, respectivamente.

O modelo de elevação com resolução espacial de 12,5 metros destaca-se dos demais em relação à distribuição das classes de relevo. Nele, há predominância de relevos suavemente ondulados, ocupando 45,84% da área. Além disso, este modelo também possui uma parcela significativa de relevos ondulados, em comparação com os outros modelos (16,41% da área, em comparação com 3,18% e 0,87% nos MDE de 30 e 1 metro, respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem). Foi observada também uma fração de relevo fortemente ondulado equivalente a 0,28% da área total da delimitação do modelo digital de 12,5 metros.

Assim, com base nos dados da Tabela 6 e no Quadro 8, bem como a visita realizada na área de estudo para a coleta dos pontos de controle, pode-se concluir que a microbacia delimitada se classifica como uma superfície de topografia esbatida ou horizontal, caracterizada por desnivelamentos muito pequenos e a presença de conjuntos e/ou outeiros com declividade suave. Ademais, não foram identificadas as demais classes de relevo (montanhoso e escarpado) para a área de estudo nos modelos digitais de elevação.

Tratando-se da textura topográfica, os valores obtidos para o resultado expresso em quilômetros (0,59, 0,52 e 0,47 para as resoluções de 30, 12,5 e 1 metro, respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem) representam áreas com textura grosseira. Para Back (2021), a textura grosseira representa áreas com espaçamento ampliado entre os canais de drenagem, sugerindo maior dissecação e servindo como indicador do estágio erosivo. Também, observou-se uma dispersão média (11,98%) nos valores obtidos para a textura topográfica em relação às três delimitações da microbacia.

Na Tabela 7 estão as classes de textura topográfica e as razões de textura média em relação ao perímetro, expresso em milhas e quilômetros.

Tabela 7 - Classes de textura topográfica

Classes de textura topográfica	Razão da textura média	
	Perímetro expresso em milhas	Perímetro expresso em quilômetros
Grosseira	Abaixo de 2,5	Abaixo de 4,0
Média	Entre 2,5 e 6,2	Entre 4,0 e 10,0
Fina	Acima de 6,2	Acima de 10,0

Fonte: Christofolletti (1969, p. 42); adaptado por Costa (2023)

Por fim, de acordo com Back (2014), a textura topográfica guarda uma relação direta com a sinuosidade dos canais de drenagem: quanto mais sinuoso o canal, maior será a razão de textura.

5.3.5 Densidade de drenagem e densidade hidrográfica

Os parâmetros relativos à densidade de drenagem e densidade hidrográfica da microbacia estudada nesta pesquisa foram sintetizados no Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos às densidades hidrográficas e de drenagem em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa

Parâmetro morfométrico	MDE de 30 metros	MDE de 12,5 metros	MDE de 1 metro (reamostrado)	Coefficiente de variação
Densidade de drenagem (Dd)	0,40 km/km ²	0,35 km/km ²	0,32 km/km ²	10,71%
Densidade hidrográfica (Dh)	0,15 canais/km ²	0,14 canais/km ²	0,15 canais/km ²	4,31%

Fonte: Autoria própria (2024).

A densidade de drenagem correlaciona o comprimento total dos canais ou rios e a área da bacia hidrográfica. Uma bacia com alto valor de densidade de drenagem evidencia uma resposta rápida de escoamento da precipitação na área da bacia (Padilha, 2017). Além disso, Beltrame (1994) realizou uma classificação das densidades de drenagem, como apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Classes para a densidade de drenagem

Densidade de drenagem (km/km ²)	Classes
Menor que 0,5	Baixa
De 0,5 a 2,0	Mediana
De 2,01 a 3,5	Alta
Maior que 3,5	Muito alta

Fonte: Beltrame (1994); Adaptado por Costa (2023).

De acordo com os dados obtidos (0,40; 0,35 e 0,32 km/km² para as resoluções de 30; 12,5 e 1 metro de resolução do MDE, respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem) e com o Quadro 9, a microbacia de estudo possui uma baixa classificação quanto a densidade de drenagem.

Já a densidade hidrográfica, essencial para compreender o comportamento hidrológico de uma área, reflete a capacidade de uma bacia de gerar novos cursos d'água, conforme destacado por Christofolletti (1980). O Quadro 10 faz referência à classificação da densidade hidrográfica em intervalos de valores.

Quadro 10 - Classificação da densidade hidrográfica (Dh) de bacias

Dh (N ¹ /Km ²)	Denominação
< 3	Baixa
3 - 7	Média
7 - 15	Alta
> 15	Muito alta

N¹ = Comprimento dos rios de primeira ordem, conforme Strahler (1952)

Fonte: Santos (2012) apud Lollo (1995).

De acordo com os dados obtidos (0,15; 0,14 e 0,15 canais/km² para as resoluções de 30, 12,5 e 1 metros de resolução espacial do MDE, respectivamente, e sendo o último produzido por reamostragem) e com o Quadro 10, a microbacia de estudo possui uma baixa classificação quanto a densidade hidrográfica.

Ter uma baixa densidade de drenagem ou uma baixa densidade hidrográfica, significa que há poucos canais de drenagem presentes em uma determinada área em relação à sua extensão total. Isso pode ocorrer em regiões onde há uma topografia plana ou suave, com poucas elevações significativas para direcionar o fluxo de água. Como resultado, a água pode permanecer estagnada por períodos mais longos ou pode se infiltrar lentamente no solo.

E é claro que a microbacia de drenagem urbana estudada revelou baixos valores de densidade hidrográfica e de drenagem, o que se atribui à sua característica de possuir apenas um curso d'água, conforme estabelecido pela delimitação do IBGE (2023).

Por fim, houve baixa dispersão do coeficiente de variação para densidade hidrográfica (D_h), com 4,31%, e média dispersão para a densidade de drenagem (D_d), com 10,71%. Essa baixa variabilidade, mesmo para a densidade de drenagem, indica que as características de drenagem e de hidrografia da área são relativamente estáveis entre os diferentes modelos digitais de elevação.

5.3.6 Tempo de concentração

Os parâmetros relativos ao tempo de concentração da microbacia estudada nesta pesquisa foram sintetizados no Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos parâmetros morfométricos relativos ao tempo de concentração em diferentes resoluções de modelos digitais de elevação (MDE) para a microbacia estudada nesta pesquisa

Parâmetro morfométrico	MDE de 30 metros	MDE de 12,5 metros	MDE de 1 metro (reamostrado)	Coeficiente de variação
Tempo de concentração (t_c)	56,59 min	56,66 min	47,57 min	9,24%

Fonte: Autoria própria (2024).

Considera-se o tempo de concentração como um outro parâmetro para interpretar as características morfométricas de uma bacia hidrográfica. Este representa o intervalo, a partir do início da precipitação, necessário para que toda a bacia contribua com a vazão na seção de controle. Um tempo de concentração menor indica maior propensão a enchentes e maior impermeabilização, sendo característico de bacias altamente urbanizadas.

Para Araújo (2011), os principais elementos que afetam o tempo de concentração de uma bacia específica incluem sua forma, declividade média, sinuosidade e inclinação do curso d'água principal.

Os tempos de concentração obtidos para diferentes os MDE são relativamente próximos entre si, sendo 56,59; 56,66 e 47,57 minutos para 30, 12,5 e 1 metro (reamostrado), respectivamente. Esta consistência nos tempos de concentração sugere uma estabilidade nos resultados, apesar da variação na resolução espacial dos modelos, o que é indicado pelo baixo coeficiente de variação de 9,24%.

No entanto, é importante ressaltar que mesmo pequenas variações nos tempos de concentração podem ter impactos significativos na modelagem hidrológica e na gestão de recursos hídricos, especialmente em situações de eventos extremos de precipitação. Ademais, o MDE de 1 metro (reamostrado) foi o que obteve maior tempo de concentração, refletindo em uma maior vazão de projeto, logo, é fundamental considerar a precisão dos dados de entrada e as incertezas associadas ao processo de modelagem ao interpretar esses resultados.

5.3.7 Intensidade da chuva

A partir da equação que correlaciona a intensidade máxima da chuva, a duração (tempo de concentração) e a frequência das precipitações (tempo de retorno), foi possível o cálculo da intensidade da chuva para os tempos de retorno, previstos no item 4.3.5.3 quanto às características da rede de drenagem, utilizando constantes de ajustes locais (a, b, c e d) específicos do local de estudo (Mossoró - RN).

Os resultados da determinação das intensidades máximas de chuva para cada modelo digital de elevação, considerando variações na resolução espacial e utilizando os tempos de concentração calculados no item 5.3.6, estão apresentados na Tabela 10.

Analisando os dados, pode-se observar que, em geral, a intensidade da chuva aumenta à medida que o tempo de retorno aumenta, o que é esperado, pois eventos de maior magnitude tendem a ocorrer com menor frequência.

Ademais, ao comparar os modelos de baixa resolução (30 e 12,5 metros) contra o modelo de alta resolução espacial (1 metro, reamostrado), pode-se notar uma estabilidade entre os valores para os modelos de baixa resolução espacial, enquanto que a intensidade da chuva tende a ser mais baixa quanto menor for a resolução do MDE. Isso sugere que a resolução do modelo de elevação digital pode ter um impacto significativo na estimativa da intensidade da chuva, com resoluções mais altas geralmente produzindo valores mais altos de intensidade da chuva.

Tabela 10 - Estimativa da intensidade da chuva máxima para a microbacia estudada nesta pesquisa, considerando diversos tempo de retorno associados e variando a resolução espacial dos modelos digitais de elevação (MDE)

Tempo de retorno (anos)	Intensidade da chuva			Coeficiente de variação
	MDE 30 metros	MDE 12,5 metros	MDE 1 metro (reamostrado)	
2	42,03 mm/h	42,00 mm/h	46,14 mm/h	5,67%
5	54,11 mm/h	54,07 mm/h	59,40 mm/h	
10	65,50 mm/h	65,45 mm/h	71,90 mm/h	
15	73,25 mm/h	73,19 mm/h	80,41 mm/h	
20	79,29 mm/h	79,24 mm/h	87,05 mm/h	
25	84,32 mm/h	84,26 mm/h	92,57 mm/h	
30	88,67 mm/h	88,61 mm/h	97,34 mm/h	
35	92,52 mm/h	92,46 mm/h	101,57 mm/h	
50	102,08 mm/h	102,01 mm/h	112,06 mm/h	
60	107,34 mm/h	107,27 mm/h	117,84 mm/h	
75	114,16 mm/h	114,07 mm/h	125,32 mm/h	
90	120,04 mm/h	119,95 mm/h	131,78 mm/h	
100	123,58 mm/h	123,49 mm/h	135,66 mm/h	

Fonte: Autoria própria (2024).

Também, vale ressaltar que, para um mesmo tempo de retorno, as disparidades na intensidade da chuva entre os distintos modelos de elevação digital são mínimas, apresentando um coeficiente de variação de apenas 5,67%. Isso sugere que, apesar das variações na resolução, os modelos são consistentes em suas previsões.

5.3.8 Vazão total

O tamanho da bacia hidrográfica desempenha um papel significativo na escolha da fórmula para estimar a máxima vazão provocada por uma chuva de intensidade uniforme em bacias. Em bacias menores, a influência de características locais, como a topografia, o uso do solo e a vegetação, tende a ser mais dominante em comparação com bacias maiores. Como resultado, fórmulas simplificadas que levam em conta essas características locais específicas podem ser mais apropriadas para microbacias.

Um exemplo disso, é a fórmula do método Racional que “estima a vazão máxima de um escoamento de uma determinada área sujeita a uma intensidade máxima de precipitação, com um determinado tempo de concentração” (Vuitik, 2023). Além disso, o método racional “é o que apresenta valores mais desfavoráveis, ou seja, aqueles que devem ser utilizados no

dimensionamento dos órgãos de drenagem, e que nos garantem maior segurança em casos extremos” (Batista, 2010, p. 26).

O método Racional para a estimação da vazão máxima é recomendado para bacias de até 4 km² (Rocha, 2023). Nesse contexto, surge o método racional corrigido para expandir o limite da área calculável para a vazão, como a pesquisa realizada por Schlickmann (2020), que demonstra eficiência na aplicabilidade da equação corrigida para bacias de até 8 km². A Tabela 11 apresenta a estimativa dos valores da vazão máxima obtidos nesta pesquisa utilizando três modelos digitais de elevação, variando a resolução espacial.

Observa-se, pela Tabela 11, que conforme o tempo de retorno aumenta, as vazões máximas também aumentam para todos os modelos digitais de elevação. Isso indica uma tendência esperada, uma vez que a vazão máxima está diretamente relacionada à probabilidade de ocorrência de eventos extremos de chuva.

Além disso, é possível notar que, para cada tempo de retorno, as vazões máximas calculadas para o MDE com resolução de 1 metro (reamostrado) tendem a ser maiores em comparação com as vazões calculadas para os MDEs com resoluções de 30 e 12,5 metros. Isso sugere que a precisão da resolução espacial do modelo digital de elevação pode influenciar significativamente as estimativas de vazão máxima, com resoluções mais altas fornecendo resultados mais elevados. Essa análise é bastante similar ao parâmetro de intensidade de chuva, onde resoluções mais altas em dados de precipitação também resultaram em valores de intensidade de chuva mais altos, influenciando diretamente a magnitude das vazões calculadas.

Na estimativa da vazão máxima, observou-se uma dispersão ainda menor dos dados (3,67%) entre as variações dos modelos digitais de elevação em comparação com a análise para a estimativa da intensidade da chuva (5,67%).

Tabela 11 - Estimativa da vazão máxima para a microbacia estudada nesta pesquisa, considerando diversos tempo de retorno associados e variando a resolução espacial dos modelos digitais de elevação (MDE)

Tempo de retorno (anos)	Vazão total			Coeficiente de variação
	MDE 30 metros	MDE 12,5 metros	MDE 1 metro (reamostrado)	
2	18,48 m ³ /s	19,30 m ³ /s	19,89 m ³ /s	3,67%
5	23,80 m ³ /s	24,85 m ³ /s	25,61 m ³ /s	
10	28,81 m ³ /s	30,08 m ³ /s	31,00 m ³ /s	
15	32,21 m ³ /s	33,64 m ³ /s	34,67 m ³ /s	
20	34,87 m ³ /s	36,42 m ³ /s	37,53 m ³ /s	
25	37,09 m ³ /s	38,73 m ³ /s	39,91 m ³ /s	
30	39,00 m ³ /s	40,73 m ³ /s	41,97 m ³ /s	
35	40,69 m ³ /s	42,50 m ³ /s	43,79 m ³ /s	
50	44,90 m ³ /s	46,89 m ³ /s	48,32 m ³ /s	
60	47,21 m ³ /s	49,30 m ³ /s	50,81 m ³ /s	
75	50,21 m ³ /s	52,43 m ³ /s	54,03 m ³ /s	
90	52,79 m ³ /s	55,13 m ³ /s	56,82 m ³ /s	
100	54,35 m ³ /s	56,76 m ³ /s	58,49 m ³ /s	

Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos nesta pesquisa sobre a delimitação de microbacias de drenagem urbana em Mossoró - RN, ficou evidente que a resolução espacial do MDE desempenhou um importante papel na precisão da delimitação das microbacias. Pois, a análise das características morfométricas das microbacias revelaram ou uma leve redução ou um leve aumento nos parâmetros morfométricos à medida que a resolução do MDE aumenta. Essa análise destaca a influência da resolução espacial do MDE na determinação das características geométricas das microbacias, com implicações significativas para o planejamento urbano e a gestão dos recursos hídricos.

Também, ainda sobre os parâmetros morfométricos, a comparação entre os diferentes modelos digitais de elevação também permitiu identificar variações na intensidade da chuva estimada e nas vazões máximas calculadas para diferentes tempos de retorno. Esses resultados indicaram que as resoluções mais altas tendem a produzir valores mais altos de intensidade da chuva e vazões máximas.

A validação dos modelos digitais de elevação, realizada por meio da comparação por soma das diferenças entre coordenadas altimétricas dos pontos coletados em campo e as coordenadas dos mesmos pontos extraídos dos MDE, confirmou a exatidão dos resultados obtidos para o modelo digital de elevação com 12,5 metros de resolução espacial. Com base nisso, é possível confirmar que o MDE de 12,5 metros é o mais preciso em representar as altitudes reais do terreno de estudo, uma vez que o menor valor numérico da soma das diferenças foi obtido para esse modelo.

Além disso, ficou claro, pelos valores obtidos pela comparação por soma das diferenças, que os valores numéricos do modelo digital produzido por reamostragem (1 metro) se aproxima mais dos valores numéricos encontrados para o modelo com resolução espacial de 30 metros.

Isso sugere que o método de reamostragem pode ser empregado para gerar imagens de alta resolução espacial (1 metro) quando o objetivo for substituir o uso de imagens de baixa resolução espacial (30 metros ou menos). Sendo viável para alcançar uma delimitação de microbacias mais suave, que requer menos espaço de armazenamento computacional e que seja mais acessível para ser obtida, uma vez que o acesso a modelos digitais com melhor resolução espacial, como o de 12,5 metros, pode não ser tão direto.

Contudo, continua evidente que o modelo reamostrado não é tão eficaz em representar a área de estudo com a mesma exatidão que o modelo de 12,5 metros de resolução espacial.

Em suma, os dados obtidos nesta pesquisa fornecem ideias para a facilitação da delimitação de microbacias de drenagem urbana e a gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas. Essas descobertas têm o potencial de facilitar políticas e práticas de planejamento urbano que visam promover o desenvolvimento sustentável e a resiliência das cidades às mudanças climáticas e aos desafios relacionados à drenagem urbana.

REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ, M. L. P.; ÁLVAREZ, D.; ÁLVAREZ, H. S.; MORAES, L. R. S.; SANTOS, M. E. P. Delimitação das bacias hidrográficas e de drenagem natural da cidade de Salvador. **Revista Interdisciplinar de Gestão Social**, v. 1(1), p. 107-129, 2012
- ALVES, J. D. G. Possibilidades e desafios no uso de drone para mapeamento de comunidades tradicionais na Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 05, p. 2594-2608, 2023.
- ALVES, P.B.R. **Simulações de medidas compensatórias sustentáveis de drenagem: propostas em duas microbacias urbanas**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; BENINI, S. M. Monitoramento de recursos hídricos e parâmetros de qualidade de água em bacias hidrográficas. In: ANAP, E. (org.). **Bacias hidrográficas: fundamentos e aplicações**. 2. ed. 2019. p. 204.
- ARAÚJO, B. A. M. et al. Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias urbanas. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1-18, 2011.
- ARAÚJO, V. S.; SANTOS, J. P.; ARAÚJO, A. L. C. Monitoramento das águas do Rio Mossoró/RN, no perímetro de abril/2005 a julho/2006. **Revista Holos**, Rio Grande do Norte, v.1, n.23, p.4-41, 2007.
- AZEVEDO, E.; CONCI, A.; VASCONCELOS, C. **Computação gráfica: Teoria e prática: geração de imagens**. Elsevier Brasil, 2022.
- BACK, Á. J. **Bacias Hidrográficas: classificação e caracterização física**. Florianópolis: Epagri, 2014, 162p.
- BACK, A. J.; CARLOS, F. S.; PAVEL, S. B. Análise Morfométrica da Bacia do Rio Timbé, localizada na região do município de Timbé do Sul/SC. **Anais do 6º Simpósio sobre sistemas sustentáveis**. Volume 5. Artigos completos (Bacias Hidrográficas). Toledo –PR, 2021.
- BANCO NACIONAL DIGITAL. **A cartografia histórica: do século XVI ao XVIII**. Disponível em: <https://bndigital.bn.gov.br/dossies/biblioteca-virtual-da-cartografia-historica-do-seculo-xvi-ao-xviii/artigos/terra-brasilis/>. Acesso em: 20 de fev. de 2024.
- BARBOSA, E. M.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; OLIVEIRA, L.C. Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 16, n. 4, p.589-605, 2010.
- BARBOSA, L. J. **Deteção e extração de vegetação utilizando dados lidar: Determinação de indivíduos e aglomerados**. 2017. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciência e Tecnologia da UNESP, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2017.

BATISTA, C. M. N. **Drenagem superficial de vias de comunicação**. Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 28p. 2010.

BEZERRA, J. Aquífero Guarani: características, importância e privatização. Toda matéria, 2024. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/aquifero-guarani/>. Acesso em: 25 de mar. de 2024.

BOLFE, E. L.; MATIAS, L. F.; FERREIRA, M. C. **Sistemas de informação geográfica: uma abordagem contextualizada na história**. Geografia, Vol. 33, n.1, Rio Claro, SP. 2008.

BRESSIANI, J. X. **Delimitação de áreas variáveis de afluência em ambientes de microbacias urbanas através da comparação dos métodos TauDEM e HAND**. 2016. 92.p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 42, p. 140-161, 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**. Campinas, v. 9, n.18, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2ª edição, 1980.

CORDOVIL, S. A. de F. **Desenvolvimento de um algoritmo para o traçado do divisor de águas de uma bacia hidrográfica em programas que utilizam sistemas de informações geográficas (SIG)**. 2001. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

COSTA, E. S. da., LEITE, E. F. Análise morfométrica na bacia hidrográfica do Ribeirão Vermelho-MS. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Seção Três Lagoas , v. 1, n. 38, p. 123-147, 23 jan. 2024.

COSTA, J. C. de O. **Representação cartográfica em trabalhos de geografia no Estado da Bahia**. 2008. 172p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

DIOGO, P. S. dos S. **Proposta de um sistema de informações sobre os recursos hídricos em Angola**. 2013. 119p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) - Universidade Positivo, Curitiba, 2008.

ELMIRO, M. A. T.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C. 2005. Correção de modelos de elevação InSAR através de superfícies de erro geradas por triangulação linear a partir de dados GPS e estações geodésicas eletrônicas. **Anais [...] SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, XII, Florianópolis, p.5027-5034, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**, Rio de Janeiro, 1979, 83p.

FARIA, K. M. S. de; TRINDADE, S. P. **Planejamento e Desenvolvimento Sustentável em Bacias Hidrográficas**. 2021.

FARIA, M. D; ADONIAS, I. **A Representação Cartográfica no Brasil Colonial na Coleção da Biblioteca Nacional**. Disponível em: http://consorcio.bn.br/cartografia/cart_colonial.html 2006. Acesso em: 12 de jan. de 2024.

FIGUEIRÊDO, M. C. de B.; ROSA, M. de P. P. B.; MOTA, S. et al. Monitoramento comunitário da qualidade da água: uma ferramenta para a gestão participativa dos recursos hídricos no semi-árido. **REGA**, v. 5, n. 1, p. 51-60, jan./jun. 2008.

FRANCISCO, C. N. Sistemas de Informação Geográfica e Geoprocessamento. Niterói. 2017. Universidade Federal Fluminense. Departamento de Análise Geoambiental. Disponível em: <https://www.professores.uff.br/cristiane/sistemas-de-informacao-geografica-e-geoprocessamento/>. Acesso em: 25 de mar. de 2024.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Plano de Desenvolvimento para o Sistema de Saneamento Básico do Município de Mossoró. Rio de Janeiro, 26 abr. de 2010.

GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda. 1988.

GARCIA, P. H. M. Discussão Teórica dos Métodos e Técnicas para estudos em Bacias Hidrográficas. Bauru, Ciência Geográfica. XX, v. 20, 2016.

GOMES, F. I. B. P.; ZANELLA, M. E. Histórico, causas e características da semiaridez do Nordeste do Brasil. **Geografares**, n. 37, 2023.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 12.ed. São Paulo: Nobel, 1990. 467p.

GOOGLE MAPS. Google Street View. **Imagem de Mossoró, Rio Grande do Norte**. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/gx49zNXnbmDWEKL49>. Acesso em: 12 de fev. de 2024.

GOOGLE MAPS. Google Street View. **Imagem de Mossoró, Rio Grande do Norte**. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/Zs8KKQS1EQkxKD6i8>. Acesso em: 12 de fev. de 2024.

GOULARTE, E. R. P. et al. **Delimitação automática de bacias hidrográficas por SIG: procedimentos para tratamento de MDT**. 2022.

GRAVELIUS, H. Flusskunde. Goschen Verlagshan dlung Berlin. **Morphometry of drainage basins**. Elsevier, Amsterdam, 1914.

GUIMARÃES, M. D. **A expansão urbana de Mossoró versus a infraestrutura dos serviços públicos**. 10 f. Mossoró, 2019.

INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO. O Saneamento em Mossoró. 2021. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/rn/mossoro>. Acesso em: 03 jan. de 2024

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas escolar: o que é cartografia?**. Disponível em: <https://atlasescolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia>. Acesso em: 16 de jan. de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE – Censo 2022. s/d.** Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/sobre/conhecendo-o-brasil.html>. Acesso em: 12 dez. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de mapas do IBGE.** Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 20 dez. 2023.

KIRPICH, Z.P. **Time of concentration in small agricultural watersheds.** Civil Engineering, v. 10, n. 6, p.362-, 1940.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Curitiba: Editora Organic Trading, 2006.

LEAL, A. C.; GUIMARÃES, E. M. A. Gestão de recursos hídricos e educação ambiental. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 23, p. 93-114, 2001.

LEAL, J. M.; AQUINO, C. M. S. de; SILVA, F. J. L. T. de. Uso do mapa de Declividade e do Modelo Digital de Elevação na análise do relevo do município de São Miguel do Tapuío–Piauí. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, n. 2, p. 97-107, 2019.

LIMA, G. H. A. T. de. **Dimensionamento do sistema de drenagem pluvial para o loteamento Santa Bárbara em Centralina-MG.** 2019.

LOLLO, J. A. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração do mapeamento geotécnico: sistematização e aplicação na quadrícula de Campinas.** 1995. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

MASCARENHA, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia. **Sociedade & Natureza**, 21(1): 5-18, 2009. DOI: 10.1590/S1982-45132009000100001

MATIAS, A. "Bacias hidrográficas"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/bacias-hidrograficas.htm>. Acesso em 25 de março de 2024.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. dos. **Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar?** Rio de Janeiro: Ipea, 2022. (Texto para Discussão, n. 2791).

MONTEIRO, J. B.; ROCHA, A. B.; ZANELLA, M. E. Técnica dos quantis para caracterização de anos secos e chuvosos (1980-2009): baixo curso do Apodi-Mossoró/RN. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, p. 232-249, 2012.

MINISTRÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org). **ATLAS PLUVIOMÉTRICO DO BRASIL: equações intensidade-duração-frequência**. Belém: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014

MOSCA, A. A. de O. **Caracterização Hidrológica de duas Microbacias visando à identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas**. 2003. 120p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais, Área de Concentração: Conservação de Ecossistemas Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

MOSSORÓ. Plano municipal de saneamento básico do município de Mossoró/RN. **Produto C - DIAGNÓSTICO TÉCNICO-PARTICIPATIVO**. Start, 2016. Disponível em: <https://www.prefeiturademossoro.com.br/wp-content/uploads/2019/12/DIAGN%C3%93STICO.pdf>. Acesso em: 16 dez. de 2023.

NETTO, J. P. da S. Panorama da gestão dos recursos hídricos no Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 241-258, 2022.

NICOLETE, D. A. P. et al. Delimitação automática de uma bacia hidrográfica utilizando MDE TOPODATA: aplicações para estudos ambientais na região da Cuesta de Botucatu-SP. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, 2015.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo. 1998.

OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; CURI, N.; LIMA, G. C. Caracterização ambiental e predição dos teores de matéria orgânica do solo na sub-Bacia do Salto, Extrema, MG. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, p. 143154, 2012. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n1p143>

OLIVEIRA, L. V. de; CARVALHO, S. V. de; SANTOS, L. B. L. **Desenvolvimento da biblioteca HydroC-Estudos na delimitação estocástica de bacias hidrográficas**. 2016.

OLIVEIRA, R. A. de.; TOMMASELLI, A. M. G. Geração automática de modelo digital de superfície utilizando múltiplas imagens. **Anais do III Simpósio Brasileiro de Geomática**, Presidente Prudente - SP, 26-28 de julho de 2012. v.1. p. 193-198.

PADILHA, R. M.; SOUZA, C. A. Características morfométricas do relevo e drenagem da bacia hidrográfica do Rio Carapá nos municípios de Colíder e Nova Canaã do Norte-MT. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, 52-63, 2017. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1777>

PISSARA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 297-305, mar./abr. 2004.

QGIS 3.34. 11. Análise Espacial (Interpolação). Disponível em: https://docs.qgis.org/3.34/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html. Acesso em: 14 de dez. de 2023.

QGIS 3.34. Baixar o QGIS. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html. Acesso em 14 de dez. de 2023.

RIGHETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F.; SALES, T. D. **Manejo de águas pluviais urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, Rio de Janeiro, 2009.

ROCHA, E. G. de A. **Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários**. 2023.

ROSA, D. W. B. **Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana à implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana-Bacia do Córrego do Leitão, Belo Horizonte, Minas Gerais**. 2017. 220p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SABINO, H.; VASQUES, G. M.; DART, R. O.; HERNANI, L. C. Delimitação de microbacias hidrográficas a partir de um ponto de exutório específico (pour point) utilizando dados SRTM. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 17, 2017c, Campinas. **Anais [...]** Campinas: UNICAMP. 2017c. p. 941-946. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2130

SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 3, p. 195-211, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

SANTOS, G. O. et al. Monitoramento da água em bacia hidrográfica com diferentes usos do solo no município de Rio Verde (GO). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 249-271, 2019.

SANTOS, W. de O. et al. Precipitações máximas para o município de Mossoró de 1964 a 2011 pela distribuição de Gumbel. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 207-213, 2014.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A.F.M. **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002. 289p.

SCHIEL, D. et al. **O estudo de bacias hidrográficas: uma estratégia para educação ambiental**. [S.l: s.n.], 2003.

SCHLICKMANN, R. de L. Avaliação de métodos de estimativa de vazão máxima para dimensionamento de bueiros. Avaliação de métodos de estimativa de vazão máxima para dimensionamento de bueiros. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, v. 3, n. 1, p. 1-16, 2020.

SEBUSIANI, H. R. V.; BETTINE, S. do C. Metodologia de análise do uso e ocupação do solo em microbacia urbana. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, p. 256–285, 2011.

SETTI, A. A.; FREITAS, M. A. V. de. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2001.

SHERMAN, J. Crystal Energies of Ionic Compounds and Thermochemical Applications. **Chemical Reviews**, v. 11, n. 1, p. 93-170, 1932.

SILVA, A. R. da S. J. et al. Riscos e educação ambiental na bacia hidrográfica do Tucunduba: um estudo sobre o bairro Montese, Belém/PA. **Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 481-510, 2020.

SILVA, N. M.; BITTENCOURT, A. V.; SALAMUNI, E. Contribuição à gestão da bacia hidrográfica do rio Itaqui–Campo Largo/PR pela caracterização da qualidade da água e suas condicionantes ambientais. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 64, n. 1, p. 1-13, 2011.

SOBRINHO, T. A. et al. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM**. Engenharia Agrícola, v. 30, p. 46-57, 2010.

SOUSA, A. M. Levantamento e preservação de espécies nativas da caatinga-bacia hidrográfica do Apodi-Mossoró. **XIII Encontro de Pesquisa e Extensão da UERN – ENCOPE**, 2006.

SOUSA, G. C. de. **Utilização de sistemas de retenção na fonte como forma de reduzir os efeitos do escoamento superficial no centro de Mossoró-RN**. 2017. 94p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

SOUZA, M. E. de. **Utilização de sistema de informação geográfica (SIG) na análise do meio físico. Estudo de caso: A área do município de Campinas entre os meridianos 47°15' e 46°45'W e os paralelos 22°45' e 22°51'S**. 1996. 84p. Dissertação (Mestrado em Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

STRAHLER, A.N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, n. 63, p.111-1141, 1952.

SULAIMAN, S. N.; ALEDO, A. Desastres naturais: convivência com o risco. **Estudos Avançados**, v. 30, p. 11-23, 2016.

SULE, B. F.; ALABI, S. A. Application of synthetic unit hydrograph methods to construct storm hydrographs. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, n. 11, p. 639-647, 2013.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). Delimitação do Semiárido - 2021: Relatório Final. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. Acesso em: 14 de fev. de 2024.

- TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfológica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. Desastres Naturais – Conhecer e Prevenir. Instituto Geológico. São Paulo: Instituto Geológico, p. 11-23, 2009.
- TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Viçosa, 2005.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.
- UMEKI, K. L. et al. **Protocolo de avaliação da qualidade de água de bacias hidrográficas baseado em indicador ambiental: estudo aplicado na sub-bacia hidrográfica do Rio do Campo**. 2020. 107p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2020.
- VALE, R. A. V.; LEMOS FILHO, L. C. A. **Análise de Índices de Qualidade de Água da Bacia Hidrográfica Apodi-Mossoró**. 2020. 57 p. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020.
- VALERIANO, M. de M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos: INPE, 2004, 72p.
- VILLELA, S.M., MATTOS, A. **A Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.
- VUITIK, G. A. et al. Métodos de cálculo de vazão de escoamento superficial em bacias rurais de diferentes escalas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, 2023.
- WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 2, p. 193-213, 2006.
- WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. Editora da CETESB. São Paulo, SP, 1978.

**APÊNDICE A – ALTITUDES OBTIDAS DOS PONTOS COLETADOS EM CAMPO E
EXTRAÍDOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS NESTA
PESQUISA (CONTINUA)**

ID	Altitude (m)			
	Pontos de Controle	MDE 30 m	MDE 12,5 m	MDE 1 m
0	43,25500	52,00000	43,12716	51,48978
1	41,38700	52,00000	44,00000	51,57172
2	32,33700	43,00000	35,00000	42,78670
3	29,05400	38,00000	33,00000	39,00422
4	24,47400	33,15118	26,17608	32,97192
5	26,02300	33,28939	28,00000	34,02383
6	26,72100	37,00000	30,00000	37,97603
7	30,86400	41,00000	35,00000	40,60290
8	29,26500	40,00000	31,03085	38,98460
9	31,61200	41,12904	34,00000	42,02404
10	33,41300	43,00000	34,05267	42,15204
11	29,52700	38,00000	33,00000	38,72157
12	26,73600	33,10690	26,32505	33,54576
13	24,42800	31,34284	24,31446	31,71711
14	26,67900	38,00000	29,00000	36,83234
15	29,86200	41,00000	33,03085	40,06586
16	32,71000	39,25808	36,00000	40,53001
17	28,62800	36,07559	29,10534	36,32666
18	23,77500	33,00000	25,00000	33,68450
19	21,54900	29,42760	23,00000	29,64488
20	29,05500	40,20463	33,22875	39,95095
21	26,07200	40,05345	33,09256	40,90601
22	33,44300	44,00000	35,00000	42,28554
23	28,92500	38,00000	31,07449	39,86630
24	42,16500	52,07559	45,06545	51,99595
25	40,06200	52,00000	47,00000	51,63232
26	32,67400	43,15118	37,15427	43,04006
27	36,18700	45,00000	38,00000	46,99045
28	41,00100	50,00000	42,05267	49,96250
29	40,62100	50,12904	43,18886	50,18574
30	38,38500	51,00000	43,03085	49,38461
31	39,42300	51,00000	44,03085	50,65792
32	41,21300	48,05345	41,06171	48,63330
33	38,49400	46,15118	41,00000	47,24961
34	40,77900	51,00000	44,00000	50,57882
35	37,43100	47,00000	38,22720	46,97729
36	35,78900	45,07559	39,00000	46,27732

**APÊNDICE A – ALTITUDES OBTIDAS DOS PONTOS COLETADOS EM CAMPO E
EXTRAÍDOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS NESTA
PESQUISA (CONTINUAÇÃO)**

ID	Altitude (m)			
	Pontos de Controle	MDE 30 m	MDE 12,5 m	MDE 1 m
37	33,80400	42,25808	38,00000	44,39017
38	32,21500	44,00000	39,00000	44,47340
39	36,14800	48,00000	41,00000	46,85242
40	38,57500	48,00000	40,11812	47,74308
41	34,07900	42,00000	35,00000	42,09508
42	34,44000	43,00000	37,00000	43,21108
43	32,32500	43,00000	36,03085	42,79816
44	28,82500	42,00000	37,00000	41,47285
45	29,24000	39,00000	32,00000	39,36029
46	30,69200	40,00000	33,00000	39,35325
47	35,00500	48,00000	40,00000	45,17972
48	34,84600	45,34285	39,26180	45,04908
49	35,38000	44,00000	37,00000	43,78164
50	32,79400	39,47189	33,48525	38,58889
51	31,74900	45,00000	39,00000	42,86362
52	32,59000	43,12904	37,08727	44,37712
53	34,45600	45,07559	37,08352	44,69351
54	33,61400	44,00000	36,00000	42,97451
55	30,98700	41,00000	35,00000	41,21502
56	40,75300	51,00000	44,00000	49,28958
57	42,41900	54,00000	49,00000	53,41487
58	39,97500	47,44975	40,77571	47,54799
59	35,47300	47,25808	40,24153	47,60282
60	32,32600	46,00000	36,13619	44,36808
61	41,08400	52,00000	45,00000	52,33238
62	41,48300	51,00000	44,05267	51,27476
63	40,02800	48,00000	41,00000	50,20400
64	42,20000	52,07559	46,00000	52,70431
65	40,14900	51,18249	45,06171	51,60945
Média	33,96473	43,83209	36,98037	43,81897