



UFPE

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGreste
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ELYFAS ALLYJACKSON MORAIS RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DO MODELO DIGITAL DO
TERRENO SOBRE A GERAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA.**

CARUARU

2019

ELYFAS ALLYJACKSON MORAIS RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO SOBRE A GERAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

CARUARU

2019

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

R696a Rodrigues, Elyfas Allyjackson Morais.
Avaliação da influência da resolução do modelo digital do terreno sobre a geração da rede de drenagem em uma bacia hidrográfica. / Elyfas Allyjackson Morais Rodrigues. – 2019.
72 f. il. : 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Hidrografia. 2. Recursos hídricos. 3. Medição – água. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-086)

ELYFAS ALLYJACKSON MORAIS RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO SOBRE A GERAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato

APROVADO com nota _____

Caruaru, 26 de junho de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Almir Cirilo: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina de TCC)

*A Deus, pela força e coragem cedida
para enfrentar os desafios impostos.
A meus pais, por não medirem
esforços para que eu concluisse mais
esse capítulo da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por mais uma conquista alcançada, agradecer pela força e coragem, ao decorrer dessa caminhada.

Agradeço a meus pais, Eraldo Rodrigues e Maria Silva, sendo os grandes responsáveis por essa conquista, mostrando que se deve ter acima de tudo força para lutar pelos seus sonhos, respeito ao próximo e por dedicarem tempo e recursos para que pudesse concretizar a graduação.

Agradeço a meu Tio, Emanuel Moraes, por ter me incentivado, a bastante tempo atrás, com uma frase que até hoje reflete em mim, isso com certeza mudou minha forma de buscar novos desafios sem temer a falha, até porque ela existe e devemos apenas aprender com ela e sermos melhores a cada dia.

Agradeço a minha namorada, Lays Costa, por todo amor, incentivo e ajuda no dia-a-dia.

Agradeço ao Prof. Juan Carlos Pina, pela confiança nos primeiros períodos em me conceder a oportunidade de ministrar monitorias em sua disciplina durante os períodos permitidos.

Agradeço ao meu orientador, José Almir Cirilo, por todo incentivo, conhecimento compartilhado, pela persistência nesse trabalho e por todas outras atividades realizadas durante a graduação. Agradeço também a Mirelly Farias, do Projeto Caruaru 3D, por sua orientação e sugestões na etapa final desse estudo.

E por fim, gostaria de agradecer especialmente aquelas pessoas que fizeram meu dia-a-dia, nos últimos cinco anos, únicos, que apesar de todo estresse, todo cansaço, conseguiram fazer o dia ficar mais leve a cada sorriso que conseguiam tirar de mim. Agradeço a cada pessoa por ter feito parte desse capítulo, sem vocês a graduação não teria tanta intensidade. Dividir isso com vocês foi incrível e agora no final entendo o propósito de todos problemas encarados, precisava de vocês para me tornar o que sou hoje.

"I don't know where all the rivers run, I don't know how far, I don't know how come, but I'm gonna die believin', each step that I take ain't worth the ground that I walk on, if we don't walk it our own way." Jon Bon Jovi.

RESUMO

A evolução da tecnologia de modelos de representação de terreno proporcionou uma grande melhoria nas análises de parâmetros hidrológicos de uma determinada área, possibilitando obter, através de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE), as delimitações de bacias e sub-bacias hidrográficas, obtenção da rede hídrica, cálculo de volume retido em depressões e outras características do solo e relevo, facilitando o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos. Um dos desafios que surge com a crescente utilização destas ferramentas no estudo de bacias hidrográficas está no controle de qualidade que os MDTs ou MDEs apresentam, influenciando diretamente nas tomadas de decisões. No mundo, entre os MDEs mais empregados para análises hidrológicas estão os dados provenientes da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que no Brasil, após passarem por um refinamento e correções de erros, compuseram o banco de dados planimétricos em escala 1:250.000 do programa TOPODATA. No Estado de Pernambuco, um mapeamento foi realizado em seu território via tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR), buscando-se apresentar dados de alta resolução espacial, 1:5.000 em todo seu território e 1:1.000 em algumas cidades pernambucanas, atendendo ao Padrão de Erro Cartográfico para Produtos Digitais (PEC-PCD) classe A. Assim, esta pesquisa objetivou a geração e análise da rede de drenagem da bacia do Ipojuca através dos dados em escala 1:250.000 e 1:5.000. O presente estudo ainda tratou da avaliação planimétrica do trecho principal do rio Ipojuca, gerado a partir dos modelos em escala 1:250.000, 1:5.000 e 1:1.000, nas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada, através de métodos de acurácia posicional. Foi empregado o uso da ferramenta de análise hidrológica ArcHydros e com o auxílio de seus algoritmos, obteve-se a rede hidrográfica da bacia. Para a verificação da acurácia posicional das redes geradas a partir dos modelos citados, foram utilizados os métodos da Banda de Épsilon, Distância de Hausdorff e Influência do Vértice, que compararam feições lineares a partir de uma linha de referência pré-determinada e com isso obteve a discrepância posicional, levando em consideração os comprimentos das feições, posição de seus vértices ou área gerada pelo erro planimétrico. A rede hidrográfica gerada para toda a bacia pelo MDT 1:5.000 apresentou melhor continuidade devido a sua precisão planimétrica, já nos trechos comparados nas três escalas, o MDT de 1:5.000 apresentou erro planimétrico muito menor que o MDE 1:250.000, porém foi o MDT em 1:1.000 que apresentou segmentos com menor erro posicional em relação à posição real do rio, em todos trechos analisados do rio Ipojuca.

Palavras-chave: Rede hidrográfica. PE3D. MDT. Acurácia Posicional.

ABSTRACT

The evolution of the technology of terrain representation models allowed a great improvement in the analysis of hydrological parameters of a given area, making it possible to obtain, through Digital Terrain Models (DTM) and Digital Elevation Models (DEM), basins and sub-basins delimitation, obtaining of the water network, calculation of volume retained in depressions and other soil characteristics and relief, facilitating the management and planning of water resources. One of the challenges due to the increasing use of these tools in the study of a basin is in the quality control that the DTMs or DEMs present, directly influencing in decision making. In the world, the MDEs most used for hydrological analysis are data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), which in Brazil, after undergoing a refinement and correction of errors, made the planialtimetric database in scale 1:250,000 of the program TOPODATA. In the State of Pernambuco, a mapping was carried out in its territory via the Light Detection and Ranging (LiDAR) technology, aiming to present data of high spatial resolution, 1:5,000 in all its territory and 1:1,000 in some cities of Pernambuco, meeting the Cartographic Error Pattern for Digital Products (PEC-PCD) class A. This research aimed at the generation of the drainage network of the Ipojuca basin through the 1:250,000 and 1: 5,000 scale data. The present study also dealt with the planimetric evaluation of the main section of the Ipojuca River, generated from the 1:250,000, 1:5,000 and 1:1,000 scale models in the cities of São Caetano, Caruaru and Escada, using positional accuracy methods. The present study also dealt with the planimetric evaluation of the main section of the Ipojuca River, generated from the 1:250,000, 1:5,000 and 1:1,000 scale models in the cities of São Caetano, Caruaru and Escada, using positional accuracy methods. Was used the ArcHydros hydrological analysis tool and with the aid of its algorithms, the hydrographic network of the basin was obtained. For the verification of the positional accuracy of the networks generated from the mentioned models, the Epsilon Band, Hausdorff Distance and Vertex Influence methods were used, which compare linear features from a predetermined reference line and thus obtained the positional discrepancy, taking into account the lengths of the features, position of their vertices or area generated by the planimetric error. The hydrographical network generated for the entire basin by MDT 1:5,000 presented better continuity due to its planialtimetric precision. Compared to the three scales, the MDT of 1:5,000 that presented a planimetric error much smaller than the MDE 1:250,000, but it was the MDT in 1:1,000 presented segments with the lowest positional error in relation to the real position of the river in every analyzed part of the Ipojuca river.

Keywords: Hydrographic network. PE3D. DTM. Positional Accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área levantada pela SRTM.....	23
Figura 2 - Representação da nave utilizada na missão.....	24
Figura 3 - Divisão em Articulações 1:5.000 do território de Pernambuco.....	28
Figura 4 - Divisão do território de Pernambuco em lotes para cobertura do perfilamento a laser.	
.....	28
Figura 5 - Forma de comparar duas feições lineares através do método da Banda Épsilon ..	33
Figura 6 - Forma de comparar duas feições lineares através do método da Distância de Hausdorff ..	34
Figura 7 - Forma de comparar duas feições lineares através do método da Influência do Vértice.	
.....	35
Figura 8 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ipojuca.....	37
Figura 9 - Relevo da bacia do Ipojuca.....	38
Figura 10 - Municípios de Pernambuco: Destaque para os municípios de São Caetano e Escada.	
.....	39
Figura 11 - Preenchimento dos <i>sinks</i>	41
Figura 12 - Declividade de um pixel	41
Figura 13 - Direções de fluxo de um pixel	42
Figura 14 - Grade de fluxo	43
Figura 15 - Grade de acumulação de fluxo	43
Figura 16 - Grade de segmentação de fluxo	44
Figura 17 - Quadrículas selecionadas para composição da área da bacia.	45
Figura 18 - Fluxograma de algoritmos para geração da rede hídrica.....	46
Figura 19 - Divisão da bacia em sub-bacias.....	47
Figura 20 - Seleção das quadriculas que recobrem a área da bacia.....	48
Figura 21 - Quadrícula com pixels " <i>no data</i> ".	49
Figura 22 - Fluxograma de algoritmos aplicados para o método da Banda Épsilon	51
Figura 23 - Fluxograma de algoritmos aplicados para o método da Distância de Hausdorff.	53
Figura 24 - Fluxograma de algoritmos aplicados para o método da Influência do Vértice.	55
Figura 25 - Comparação de um trecho do rio Ipojuca na cidade de Escada nas diferentes escalas.	
.....	57
Figura 26 - Rede de drenagem gerada pela escala 1:250.000	58
Figura 27 - Rede de drenagem gerada pela escala 1:5.000.	59

Figura 28 - Comparação do perfil longitudinal do rio Ipojuca.....	61
Figura 29 - Comparação dos trechos gerados na cidade de São Caitano.	62
Figura 30 - Comparação dos trechos gerados na cidade de Caruaru.....	63
Figura 31 - Comparação dos trechos gerados na cidade de Escada.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do PEC pelo Decreto Nº 89.817	30
Tabela 2 - Classificação do PEC-PCD pelo DSG	31
Tabela 3 - Tempo de processamento dos algoritmos para bacia na escala 1:250.000.....	57
Tabela 4 - Tempo de processamento dos algoritmos para bacia na escala 1:5.000.....	59
Tabela 5 - Banda de Erro Épsilon para as escalas 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000 para as três cidades.....	65
Tabela 6 - Distância de Hausdorff para os trechos do rio Ipojuca obtidos nas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada.....	65
Tabela 7 - Discrepância posicional dada pelo método da Influência do Vértice.....	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
D8	Algoritmo Determinístico 8
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ET – ADGV	Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
GL	Grupo de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INS	<i>Inertial Navegation System</i>
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNT	Modelo Numérico de Terreno
NASA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
OSGeo	<i>Open Source Geospatial Foundation</i>
PCD	Produtos Cartográficos Digitais
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC),
PERH/PE	Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco
QGIS	Quantum GIS
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SCI	<i>Spatial Information</i>

SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura de Pernambuco
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TauDEM	<i>Terrain Analysis Using Digital Elevation Models</i>
UP	Unidade de Planejamento Hídrico
USDD	<i>United States Department of Defense</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulados

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Declividade entre pixels (m/m)
d	Dimensão do pixel (m)
D	Discrepância posicional (m)
z	Cota do pixel (m)
ε	Banda de Erro Épsilon (m)
A	Área (m^2)
L_T	Comprimento do Rio de Teste (m)
L_R	Comprimento do Rio de Referência (m)
d_{1i}	Menor distância entre um vértice do rio de teste ao rio de referência (m)
d_1	Média das distâncias entre os vértices do rio de teste ao rio de referência (m)
n	Número de vértices
d_{2i}	Menor distância entre um vértice do rio de referência ao rio de teste (m)
d_2	Média das distâncias entre os vértices do rio de referência ao rio de teste (m)
l	Comprimento de um segmento do rio (m)
DH	Distância de Hausdorff (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivo geral.....	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Integração SIG com Rede Hidrográfica	21
3.2	Modelo Digital de Elevação – MDE	22
3.2.1	Modelo Digital de Terreno - MDT	22
3.3	Shuttle Radar Topography Mission - SRTM.....	23
3.3.1	TOPODATA	25
3.4	Pernambuco Tridimensional - PE3D	26
3.5	ArcHydros	29
3.6	Padrão de Erro Cartográfico - PEC	29
3.6.1	PEC - PCD	30
3.7	Métodos de Acurácia Posicional.....	31
3.7.1	Banda de Épsilon ou Método das Áreas	32
3.7.2	Distância de Hausdorff	33
3.7.3	Influência do Vértice	34
4	METODOLOGIA.....	36
4.1	Área de estudo.....	36
4.1.1	Bacia do Ipojuca - Localização.....	36
4.1.2	Relevo	37
4.1.3	São Caetano	38
4.1.4	Caruaru.....	38
4.1.5	Escada	39
4.2	Recursos Tecnológicos.....	40

4.3	Obtenção da rede hídrica da bacia do Ipojuca	40
4.3.1	Algoritmos do Archydros	40
4.3.1.1	<i>Fill Sinks</i>	40
4.3.1.2	<i>Flow Direction</i>	41
4.3.1.3	<i>Flow accumulation</i>	43
4.3.1.4	<i>Stream definition</i>	44
4.3.1.5	<i>Stream segmentation</i>	44
4.3.1.6	<i>Dranaige Line Processing</i>	44
4.3.2	MDE 1:250.000	45
4.3.3	MDT 1:5.000	47
4.4	Obtenção da rede hídrica local das três cidades	49
4.4.1	MDT 1:1000	49
4.5	Aplicação dos métodos de acurácia.....	50
4.5.1	Banda de Épsilon	50
4.5.2	Distância de Hausdorff	52
4.5.3	Influência do Vértice	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5.1	Construção do Rio de Referência.....	56
5.2	Filtragem dos rios	56
5.3	Geração da rede hídrica da bacia em 1:250.000	57
5.4	Geração da rede hídrica da bacia em 1:5.000	58
5.5	Comparação de perfis do rio principal	60
5.6	Comparação entre os trechos do rio Ipojuca nas cidades.....	62
5.6.1	Banda Épsilon	64
5.6.2	Distância de Hausdorff	65
5.6.3	Influência do Vértice	65
6.	CONCLUSÃO.....	67

REFERÊNCIAS.....68

1 INTRODUÇÃO

Quando há a necessidade e urgência de ampliação da infraestrutura, particularmente nos países em desenvolvimento, a utilização de técnicas avançadas de planejamento do uso do solo urbano e rural pode trazer sensíveis ganhos de qualidade e rapidez para elaboração de estudos como planos diretores e projetos de engenharia de maneira geral.

Nesse contexto, a caracterização do relevo de uma determinada área e a possibilidade de quantificar as transformações a serem implantadas são de extrema importância para a adequação dos produtos a ser gerados, no perfil ambiental, econômico e social. Dessa forma, torna-se importante a aplicação do processamento de dados geoespaciais do terreno, como Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Terreno (MDT), para as mais diversas situações, como expansão urbana, implantações de estradas, ferrovias, esgotamento sanitário e de gás, linhas de transmissão de energia, planejamento de unidade hídricas, determinação de rede de drenagem, entre outras aplicações (MENDES; CIRILO, 2013).

No âmbito dos recursos hídricos se tornou comum a utilização de ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) combinadas a MDE e/ou MDT para planejamento e execução de projetos em suas unidades de estudo. A delimitação de uma bacia hidrográfica, assim como a obtenção de sua rede hídrica se tornou algo mais preciso e rápido com a manipulação desses modelos digitais (TRIBE, 1992).

A qualidade dos parâmetros hidrológicos determinados a partir de MDE e MDT estão diretamente ligados ao tipo de sensor utilizado para o levantamento topográfico da área analisada e de sua resolução espacial (VAZE, 2010), devendo ter sua resolução planejada para ser compatível com a informação e precisão que se deseja obter (LIU et al., 2005). Ariza-Villaverde et al. (2015) afirmam que o uso de modelos digitais de alta resolução fornece redes de drenagem precisas e minimiza o erro planialtimétrico, especialmente quando a rede é densa.

Entre os MDEs mais utilizados pela literatura estão os derivados do programa *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Essa missão foi realizada no ano de 2000 utilizando tecnologia InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), resultando em um banco de dados planialtimétricos de praticamente todo globo terrestre (RABUS et al., 2003). Posteriormente, em 2008, o banco de dados do SRTM, até então liberado, passou por um refinamento por uma iniciativa brasileira para correção dos erros presentes nos MDEs referentes ao território do país, programa conhecido como TOPODATA (VALERIANO, 2008), passando a ser amplamente empregado em pesquisas e projetos referentes a área hídrica, como projetos de drenagem.

Em nível estadual têm-se os dados referentes ao programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), iniciativa do governo para realização do levantamento planialtimétrico de todo território do Estado, através de tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*), obtendo MDT, MDE, ortofotos e imagens de Intensidade Hipsométrica em escala 1:5.000 com pixel de resolução espacial 1,0 x 1,0 m e em algumas cidades municipais, os mesmos produtos em escala 1:1.000 com pixel 0,5 x 0,5 m.

A obtenção de parâmetros relacionados ao relevo de uma área ou até mesmo do próprio rio gerados a partir de MDTs ou MDEs de alta resolução pode impulsionar ou servir de base para estudos de modelos de simulação de vazão, estudo de assoreamento e dragagem de rios. Sendo assim, esse estudo visa a determinação da rede hídrica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca com os MDTs na escala 1:5.000, realizando um comparativo local com a acurácia posicional do trecho do rio principal que corta as cidades de São Caitano, Caruaru e Escada do Estado de Pernambuco.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O principal objetivo do trabalho é avaliar a influência da precisão e densidade de dados altimétricos para geração de redes de rios.

2.2 Objetivos específicos

- Extração da rede de drenagem a partir de MDT 1:1.000 do PE3D nas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada;
- Obtenção da localização real dos trechos do rio Ipojuca que corta as três cidades citadas, através das ortoimagens do PE3D em escala 1:1.000.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo traz os conceitos relevantes encontrados na literatura que servem como base teórica para o trabalho, abordando os seguintes temas: Integração SIG com Rede Hidrográfica; Modelo Digital de Elevação – MDE; *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM; Pernambuco Tridimensional – PE3D; ArcHydros; Padrão de Erro Cartográfico; Métodos de Acurácia Posicional.

3.1 Integração SIG com Rede Hidrográfica

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são ferramentas que possibilitam armazenar características, emitir e manusear as funções que representam o estudo do espaço terrestre, possibilitando maior eficiência em análises que requer precisão em localização. Esses dados geográficos descrevem o posicionamento real de objetos no terreno (CÂMARA; MEDEIROS, 1998). Segundo os autores, um SIG pode ser definido como sistemas que são providos de quatro grupos com aptidões de manusear bases georreferenciados, são eles os dados de entrada, gerenciamento, manipulação e análise e dados de saída.

De acordo com Câmara (2001), ferramentas computacionais para geoprocessamento permitem realizar análises complexas, ao integrar informações de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Uma das características básicas e geral em um SIG é sua capacidade de tratar a estrutura de relacionamentos espaciais que podem se estabelecer entre dois objetos geográficos.

Os Sistemas de Informações Geográficas tornaram-se meios cada vez mais importantes para compreender e lidar com os problemas urgentes da gestão de recursos hídricos no mundo. Os conceitos e tecnologias SIG ajudam a coletar e organizar as informações sobre tais problemas e entender seus relacionamentos espaciais. Os recursos de análise de SIG fornecem maneiras de modelar e sintetizar informações que contribuem para apoiar decisões de gerenciamento de recursos em uma ampla gama de escalas, do local ao global. Um SIG também fornece um meio para visualizar características, onde a compreensão aumenta em apoio à tomada de decisão, possibilitando modificações na forma em que as atividades de planejamento e projetos de engenharia de recursos hídricos são desenvolvidas (JOHNSON, 2009).

Câmara (2001), afirma que as ferramentas de SIG promovem a integração de dados de mapas topográficos, mapas de uso e ocupação do solo, imagens de satélites e referenciadas,

através da manipulação de algoritmos, gerando cadastros geocodificados e Modelos Digitais de Terreno.

Segundo Johnson (2009), uma das principais áreas para aplicação das ferramentas SIG é o processamento de dados digitais do terreno para derivar características da paisagem relevantes para a hidrologia, tais como fluxos e divisões de drenagem. A aplicação de modelos digitais na geração do fluxo de água nas bacias hidrográficas apresenta melhorias nas análises referente ao processo de escoamento superficial, estando condicionalmente relacionado a sua localização, que é possível pelas ferramentas SIG. Um dos principais dados armazenados em um SIG são os dados vetoriais, onde o espaço é considerado contínuo e são basicamente divididos em três elementos: o ponto, a linha e a área (MENDES; CIRILO, 2013).

Mendes e Cirilo (2013) apresentam a bacia e sub-bacia hidrográfica como uma estrutura vetorial de polígonos no SIG. Para os autores, a rede de drenagem de uma bacia, no SIG, apresenta-se como uma estrutura vetorial composta de linhas orientadas com o sentido de montante para jusante, onde sua representação usual ocorre através de feições lineares que passa no centro geométrico da rede, sendo que cada segmento de reta representa um trecho do rio.

3.2 Modelo Digital de Elevação – MDE

Na Cartografia Digital, o conjunto de dados que descreve a distribuição espacial de uma característica do terreno é conhecido genericamente como MDE (FRANCO, 2006). Os MDEs são obtidos através de levantamento aeroespacial, gerando um conjunto de pontos que representa todos os alvos da superfície como edifícios, pontes, vegetação e corpos d’água (CIRILO et al., 2015).

Atualmente, na engenharia, muito se emprega a geração de MDE com veículo aéreo não tripulado (VANT) e aeronaves com laser scanners.

3.2.1 Modelo Digital de Terreno - MDT

Os MDEs são empregados nas mais diversas análises, porém quando se trata de temas como planejamento de sistema viário, estudos de hidrologia, simulação de escoamento de fluidos, para melhor resultados é necessário aplicar o MDT. Os MDTs, também conhecidos como Modelos Numéricos de Terreno (MNT), são obtidos pela eliminação da vegetação e das edificações dos dados de MDE em um processo chamado de filtragem, o que pode ser feito com o auxílio de modelos matemáticos ou algoritmos (FRANCO, 2006).

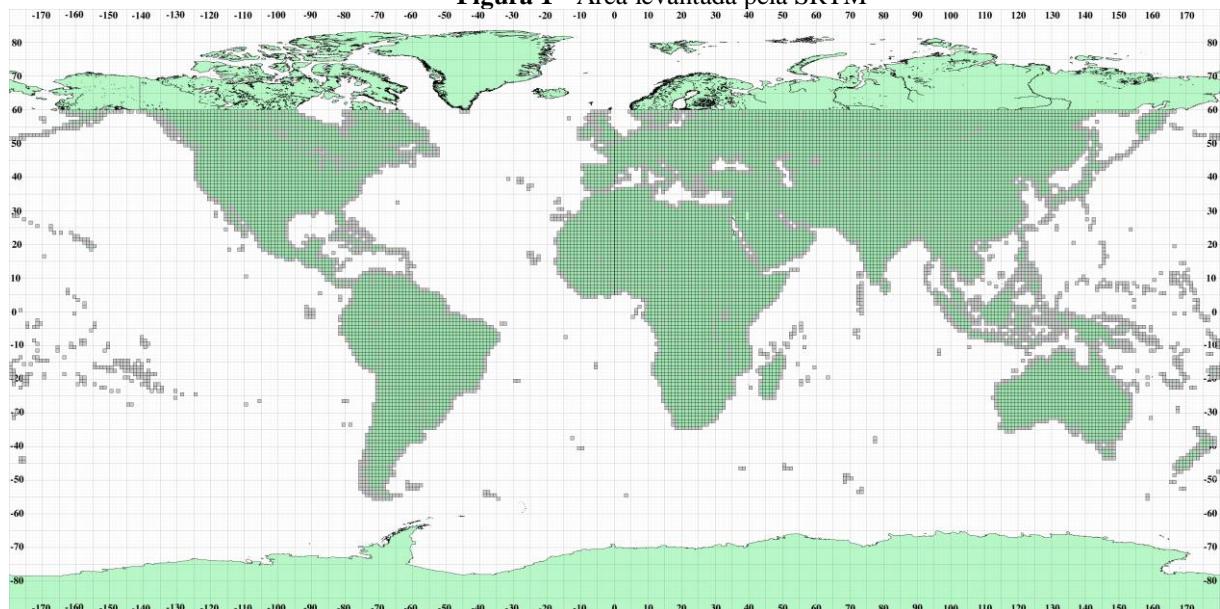
Barnes et al. (2014) afirmam que o tamanho dos modelos digitais vem aumentando consideravelmente com o passar dos anos, passando para a ordem dos Gigabytes e com estrutura composta por bilhões de pontos. As informações presentes em um MDT e/ou MDE estão condicionadas à sua resolução espacial, uma vez que quanto menor o tamanho do pixel, maior será sua representatividade, porém também necessitará de um maior potencial em equipamentos de processamento (SILVEIRA, 2000). Gong e Xie (2009) afirmam que a extração de bacias hidrográficas e seus componentes de um grande conjunto de dados de relevo pode não ser viável quando os recursos computacionais são limitados.

3.3 Shuttle Radar Topography Mission - SRTM

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi um programa realizado pela NASA em parceria com a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), *United States Department of Defense* (USDD), a agência espacial alemã, a DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) e a agência espacial italiana ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*), com o objetivo de obter uma base altimétrica global de alta resolução (SOUZA FILHO, 2003).

A missão foi realizada entre os dias 11 e 22 de fevereiro do ano 2000 a bordo da nave Endeavour, abrangendo toda superfície terrestre entre as latitudes 60°N e 57°S, utilizando da técnica de InSAR (RABUS et al., 2003). A Figura 1 expõe a área levantada representada pelas quadrículas.

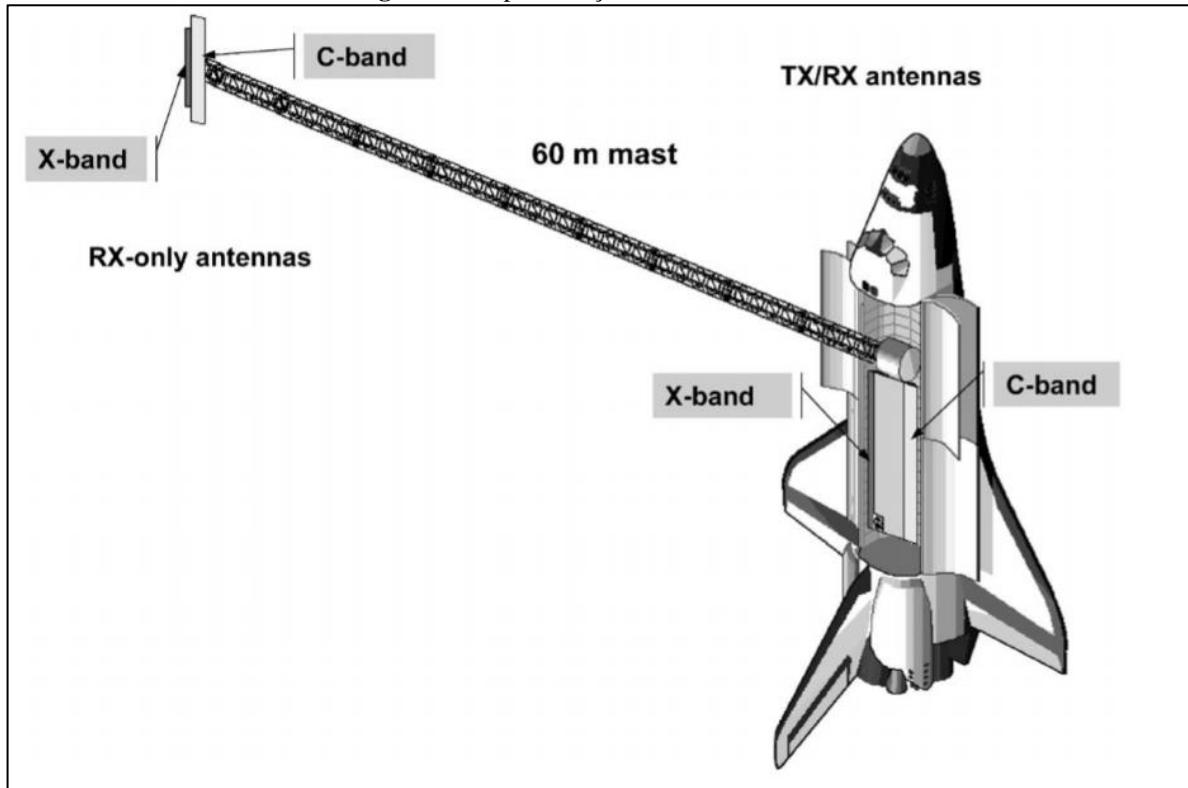
Figura 1 - Área levantada pela SRTM



Fonte: *Jet Propulsion Laboratory* (2000).

Dois são os métodos para obtenção das imagens via InSAR. O primeiro utiliza duas antenas fixadas em uma mesma plataforma, de forma que permaneçam perpendiculares a direção do voo, dando o nome de *single pass interferometry*: um sinal eletromagnético é emitido por uma das antenas e o retorno dele é captado por ambas. Já o segundo método consiste em utilizar uma única antena com duas passagens paralelas em diferentes tempos em uma determina área (HAYAKAWA et al., 2008). Segundo Barros et al. (2005), o método para captação dos dados foi o primeiro apresentado, utilizando duas antenas distanciadas em 60 metros, como exposto na representação da nave na Figura 2.

Figura 2 - Representação da nave utilizada na missão.



Fonte: Rabus et al. (2003).

O sistema de captura de imagens foi dividido em dois, banda C e X, recobrindo uma área de 119 milhões de km² e 58 milhões km², respectivamente (PESSAGNO, 2000, apud RABUS et al., 2003). A banda C emitia um comprimento de onda de 6,0 centímetros, que pertencia ao sistema americano e a banda X com um comprimento de onda de 3,1 centímetros, operado pelos sistemas alemão e italiano. De acordo com os autores, a antena de banda X estava fixado em um ângulo de 38 graus e possuía maior precisão vertical.

A aquisição dos modelos teve apoio de campo através de levantamentos geodésicos, nos quais foram empregados um método denominado Sistema de Posicionamento Global Cinemático (*Kinematic Global Positioning System*), o qual possibilita a determinação rápida de linhas de posição atribuídas por um veículo em movimento (VALERIANO, 2004). Valeriano (2004) exemplifica que cerca de 70.000 km em linhas foram coletadas para apoio à missão e além desse método, equipes do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) distribuíram pontos de controles através de refletores que possuíam coordenadas precisas.

Segundo Rabus et al. (2003), a acurácia dos dados de elevação obtidos pelo levantamento apresenta um erro máximo absoluto de 16 metros e 6 metros de precisão relativa da vertical, validadas para 90% dos dados obtidos.

O levantamento forneceu modelos tridimensionais na resolução de 1 arco-segundo (30 x 30 metros), que posteriormente foi reduzido para escala de 3 arco-segundo (90 x 90 metros). Atualmente as duas resoluções podem ser obtidas gratuitamente, pelos sites do SCI e USGS, respectivamente.

3.3.1 TOPODATA

Inicialmente apenas os dados SRTM na resolução de 3 arco-segundos foram disponibilizados para a América do Sul, em meados de 2003. Diversas falhas foram verificadas nos MDEs, como presença de picos (valores extremamente altos) e vórtices (valores extremamente baixos), contribuindo para uma má definição dos corpos d'água e das linhas de costa, sendo necessário uma correção dos dados brutos antes de sua utilização (MENDES; CIRILO, 2013).

Em 2008 foi disponibilizada uma base de dados provenientes do SRTM pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para todo o território nacional, através do projeto TOPODATA. Esse banco de dados foi refinado da resolução espacial de 3 arco-segundos para 1 arco-segundo por krigagem, em seguida foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada para evidenciação de talveges e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes para favorecer a interpretação das feições de drenagem e caracterização de sua estrutura (VALERIANO, 2008).

Os dados estão todos estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, disponíveis para download no site do INPE.

Com a aquisição dos novos dados de maior confiabilidade planialtimétrica, diversos estudos envolvendo análise topográfica e determinação de rede de drenagem superficial foram realizado, como os abordados por Marques (2011), Mantelli (2011) e Melati (2015), onde entre os modelos digitais comparados para extração e delimitação de bacias hidrográficas os MDEs do TOPODATA apresentaram maior precisão planialtimétrica.

3.4 Pernambuco Tridimensional - PE3D

Entre os anos de 2010 e 2011 o Estado de Pernambuco foi atingido por fortes chuvas que causaram inundações em 67 municípios, dos quais 30 declararam situação de emergência e 12 de calamidade pública (BANCO MUNDIAL, 2012). A tragédia levou o governo pernambucano a realizar serviços de mapeamento nas áreas afetadas, visando a obtenção de um banco de dados para iniciar projetos de construção de novas barragens, com o objetivo de mitigar as ações das cheias nos municípios da Região da Mata Sul.

O primeiro levantamento foi realizado no ano de 2011 para três bacias hidrográficas pernambucanas, as bacias do Una, Sirinhaém e Mundaú. Rios mapeados: Una, Panelas, Piranji e Sirinhaém, desde a nascente até à foz, e os rios Paraíba, Canhoto e Mundaú, das nascentes até à divisa com Alagoas (MENDES; CIRILO, 2013).

O levantamento planialtimétrico utilizou tecnologia LiDAR, que pertence à área de sensoriamento remoto, tendo por finalidade a medição de uma superfície através de luz com base na emissão de pulsos laser, onde a medição é possível pelo tempo que o pulso leva para atingir o alvo e retornar ao sistema. Pela velocidade da luz, o tempo medido é convertido em distância e associado a informações de posicionamento, obtendo-se as coordenadas tridimensionais (MACIEL, 2011). A tecnologia LiDAR permite a coleta de dados com maior velocidade e precisão, quando comparado a outras tecnologias, combinando em uma plataforma aerotransportada o Sistema de Navegação Global por Satélites (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*) fornecendo a localização da aeronave, enquanto o Sistema de Navegação Inercial (INS – *Inertial Navigation System*) determina os ângulos de altitude da aeronave (BASTOS; ERCOLIN FILHO, 2012). Nos recursos hídricos, canais derivados de modelos digitais gerados por levantamentos via LiDAR apresentam morfologia mais complexa e são mais representativos quando comparados aos derivados de modelos a partir de levantamentos convencionais (MURPHY et al., 2008).

O mapeamento digital via LiDAR, para as áreas que sofreram com as enchentes no Estado, resultou em produtos cartográficos nas escalas de 1:5.000 e 1:2.000, com as respectivas

áreas de 1.452 km² para os estirões dos rios, abrangendo uma faixa de 850 metros para cada lado e uma área de 1110 km² que cobre ainda as cidades mais atingidas pelas cheias (MENDES; CIRILO, 2013).

Posteriormente com o apoio do Banco Mundial o levantamento foi expandido para todo o território do Estado, recebendo o nome de Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). O PE3D foi iniciado pela Secretaria de Infraestrutura de Pernambuco (SEINFRA), em março 2014, buscando realizar um recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser para obtenção de dados planialtimétricos e imagens de alta resolução para o território pernambucano, por meio de oito aviões portadores de sensores para o recobrimento. Os dados obtidos do programa apresentam um enorme potencial para qualquer tipo de intervenções no terreno, como criação e construção de estradas, ferrovias, sistemas de irrigação, redes de água, esgotos, energia, gás, serviços de mineração e entre outros tipos de empreendimentos (CIRILO et al., 2014).

A área de 98.148 km² do território pernambucano foi subdividida em 13.125 articulações, representadas na Figura 3, as quais foram agrupadas em cinco lotes no sentido leste-oeste, conforme a Figura 4. O levantamento obteve um ponto cotado a cada 1,3 m², resultando em aproximadamente 75 bilhões de pontos. Os arquivos fornecidos pelo mapeamento estão dispostos em ortofotos, perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 25 cm e geração de MDT, MDE e imagens de Intensidade Hipsométrica, todos em escala 1:5.000, realizado em todo território pernambucano, com Ground Sample Distance (GSD) de 50 cm. Em 26 municípios foram realizados, em suas sedes urbanas, os mesmos produtos citados acima, porém em escala 1:1000, com uma precisão altimétrica melhor que 10 cm e GSD de 12 cm, abrangendo uma área total de 870 km² (PERNAMBUCO, 2019; CIRILO et al., 2014).

Figura 3 - Divisão em Articulações 1:5.000 do território de Pernambuco

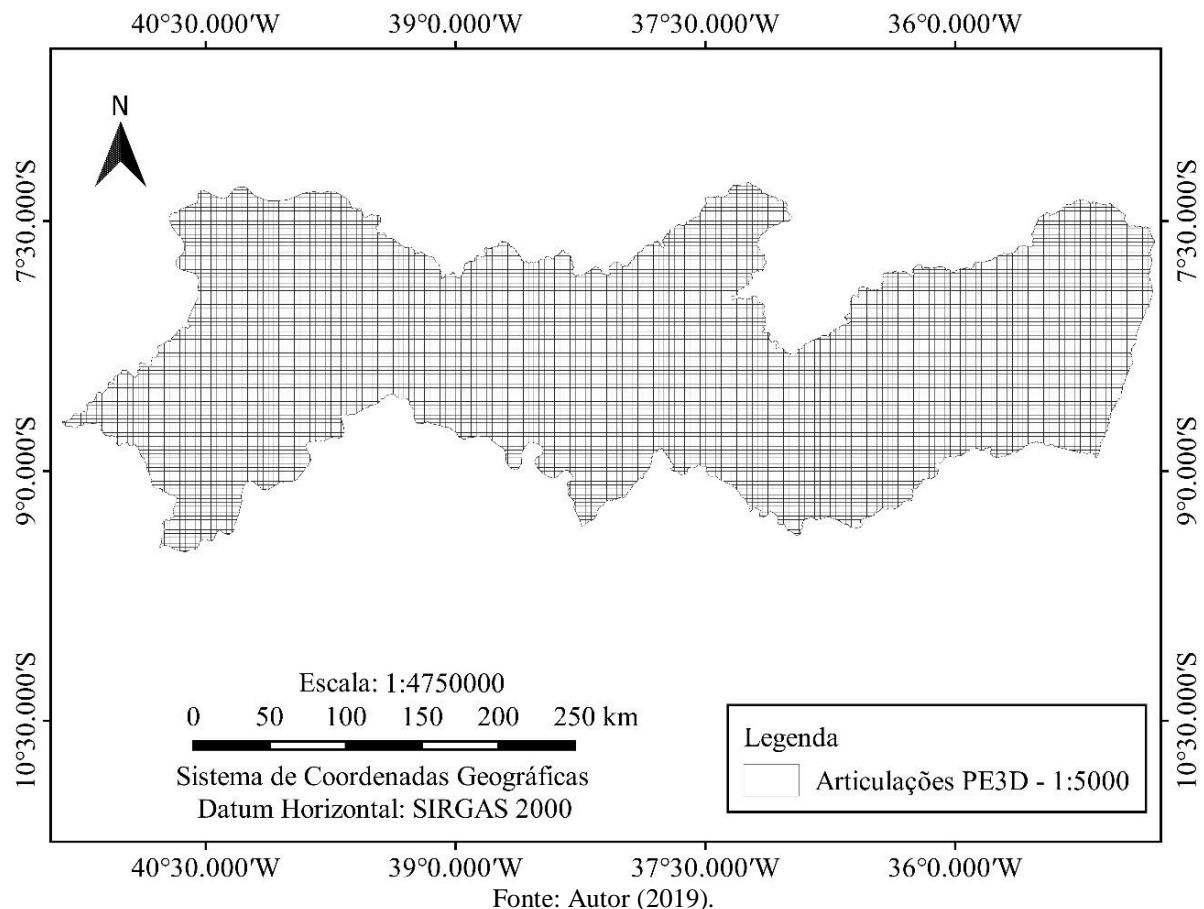
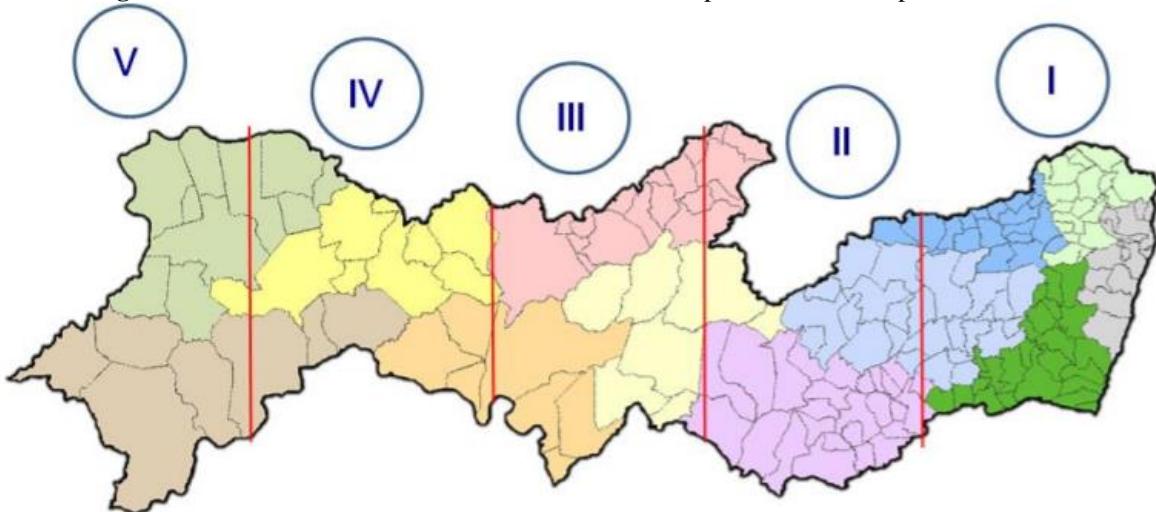


Figura 4 - Divisão do território de Pernambuco em lotes para cobertura do perfilamento a laser.



Fonte: Cirilo et al. (2014).

Todos os dados do levantamento foram contratados atendendo ao PEC-PCD referente à classe A, que após passarem por análises de completude e consistência, tendo seu conteúdo verificado em relação à conformidade com as especificações técnicas exigidas no contrato, são disponibilizados gratuitamente através da página na internet do PE3D, referenciados no Sistema

de Coordenadas Projetadas UTM Sirgas 2000, nos fusos 24S ou 25S. Atualmente cabe ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) a validação dos dados.

3.5 ArcHydros

Os *softwares* mais utilizados no mundo relacionados à geoprocessamento são o ArcGIS e Quantum GIS (QGIS), sendo esse último um software gratuito desenvolvido pela Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), funcionando nas mais diversas plataformas como Windows, Linux, Mac, entre outros (OSGeo, 2019). Já no caso do ArcGIS, trata-se de um software de propriedade da empresa Environmental Systems Research Institute (ESRI), empregado nas mais diversas áreas, apresentando grande capacidade de processamento de dados (ESRI, 2019). Licenças temporárias gratuitas são disponibilizadas para estudantes, o que ocorreu para o desenvolvimento do presente trabalho.

É comum nesses programas a presença de ferramentas para análise e gerenciamento dos recursos hídricos, com base em MDE e MDT, como delimitações de bacias e sub-bacias hidrográficas e obtenção da rede de drenagem. Complementos muito aplicados nessa área são o *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM), ferramenta que pode ser instalada no QGIS, desenvolvido por David Tarboton, do Departamento de Pesquisas Hidrológicas da Universidade de Utah e instituições cooperadas (MENDES, 2018), e o ArcHydros, complemento do ArcGIS, desenvolvido pelo Center for *Research in Water Resources* da Universidade do Texas at Austin, nos Estados Unidos, este gratuitamente distribuído pela ESRI (LEAL et al., 2017).

3.6 Padrão de Erro Cartográfico - PEC

A avaliação da qualidade de um dado geoespacial consiste em uma das etapas mais importantes de sua construção. Normas e padrões são criados para permitir que os produtos possam ser classificados. Dentre os padrões internacionais pode-se citar o *United States Map Accuracy Standards*, *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps*, *Digital Elevation Model Standards*, *Geospatial Positioning Accuracy Standards*, *Guidelines for Digital Elevation Data*, *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*, entre outros (CARVALHO; SILVA, 2018).

O controle da qualidade espacial cartográfica no Brasil é regido pelo Decreto N° 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece normas a serem observadas por todas as entidades

públicas e privadas produtoras e usuárias de serviços cartográficos. As instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional se destinam a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas de Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas (BRASIL, 1984).

O Decreto apresenta o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), em seu Art. 8, definido como um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. No Art. 9, a PEC é dividida em três classes, A, B e C, como exposto na Tabela 1. O objetivo desse Decreto é garantir a exatidão cartográfica de produtos analógicos, de acordo com as especificidades da escala de representação.

Tabela 1 - Classificação do PEC pelo Decreto Nº 89.817

Carta	Planimétrica		Altimétrica	
	PEC	Erro Padrão	PEC Altimétrico	Erro Padrão
Classe A	0,50 mm x Escala da carta	0,30 mm x Escala da carta	1/2 equidistância das curvas de nível	1/3 da equidistância das curvas de nível
Classe B	0,80 mm x Escala da carta	0,50 mm x Escala da carta	3/5 equidistância das curvas de nível	2/5 da equidistância das curvas de nível
Classe C	1,00 mm x Escala da carta	0,60 mm x Escala da carta	3/4 equidistância das curvas de nível	1/2 da equidistância das curvas de nível

Fonte: Adaptado de Brasil (1984).

3.6.1 PEC - PCD

O advento de novas tecnologias e a demanda por dados cartográficos digitais levaram à necessidade de que novos padrões de controles de qualidades para esses produtos fossem estabelecidos (TOLENTINO et al., 2017). Ainda segundo os autores, a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG), em parceria com a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), estabeleceram a Especificação Técnica para Aquisição de Dados

Geoespaciais Vetoriais (ET – ADGV), visando expor os conceitos relacionados com a qualidade posicional desejada para Produtos Cartográficos Digitais (PCD).

Os produtos cartográficos digitais passam a ser classificados em quatro classes de PEC, A, B, C e D, tendo como norteador o Decreto Nº 89.817. Na Classificação da PEC-PCD planimétrico, altimétrico e erros padrões, as classes B, C e D, correspondem, respectivamente, as classes A, B e C da PEC prevista no Decreto Nº 89.817. Já a classe A da PEC-PCD, para planimetria terá limite de 0,28 a escala do produto, enquanto para altimetria a classe A apresenta limite de 0,27 equidistância das curvas de nível. A Tabela 2 apresenta em resumo dos critérios de classificação da PEC-PCD, segundo Brasil (2015).

Tabela 2 - Classificação do PEC-PCD pelo DSG

Carta	Planimétrica		Altimétrica	
	PEC	Erro Padrão	PEC Altimétrico	Erro Padrão
Classe A	0,28 mm x Escala da carta	0,17 mm x Escala da carta	0,27 equidistância das curvas de nível	1/6 da equidistância das curvas de nível
Classe B	0,50 mm x Escala da carta	0,30 mm x Escala da carta	1/2 equidistância das curvas de nível	1/3 da equidistância das curvas de nível
Classe C	0,80 mm x Escala da carta	0,50 mm x Escala da carta	3/5 equidistância das curvas de nível	2/5 da equidistância das curvas de nível
Classe D	1,00 mm x Escala da carta	0,60 mm x Escala da carta	3/4 equidistância das curvas de nível	1/2 da equidistância das curvas de nível

Fonte: Adaptado de Brasil (2015).

3.7 Métodos de Acurácia Posicional

Segundo La Vega et al. (2016), a avaliação de acurácia posicional pode ser realizada entre duas feições, sendo uma delas a feição que se deseja testar e a outra de referência. Essas feições podem ser pontos, linhas ou polígonos. No Brasil, o âmbito do controle de qualidade cartográfica, e na maioria dos países, normas e leis têm suas especificações para a avaliação da acurácia posicional de dados baseadas em análises de pontos homólogos (SANTOS, 2015).

Apesar de no Brasil não ser comum o uso de feições lineares para controle de qualidade posicional em dados espaciais, Fonseca (2018) afirma que o uso de feições lineares na avaliação da acurácia posicional segue o mesmo procedimento ao uso de feições pontuais, em que se constitui na comparação de feições homólogas dos dados de teste e referência.

Tanto o PEC quanto o PEC-PCD não apresentam de forma clara os procedimentos metodológicos a serem aplicados no processo de avaliação da qualidade posicional. Devido à isto, métodos complementares de análise vêm sendo utilizados com o objetivo de verificar essa acurácia (CARVALHO; SILVA, 2018). Dentre os métodos existentes mais utilizados para análise da acurácia posicional, pode-se citar: Banda de Erro Épsilon; Buffer Simples; Buffer Duplo; Distância de Hausdorff; Influência do Vértice; Banda Genérica; Modelo de Erro Estatístico de Simulação; Aproximações por Spline; Ponto Gerado; entre outros.

Os métodos podem ser classificados em três grupos principais, segundo Santos (2015):

- Grupo de faixa de incerteza que utilizam uma abordagem determinística, como o método da Banda Épsilon ou Método das Áreas, Buffer Simples e Buffer Duplo;
- Grupo de faixa de incerteza utilizando uma abordagem estocástica, como a Banda Genérica e Modelo de Erros Estatístico por Simulação;
- Grupo de métodos determinísticos que realizam análises geométricas, como a Distância de Hausdorff, Influência do Vértice, Aproximação por Spline e Ponto Gerado.

Os principais métodos aplicados para a quantificação do erro planimétrico são: Banda Épsilon, Distância de Hausdorff e Influência do Vértice.

3.7.1 Banda de Épsilon ou Método das Áreas

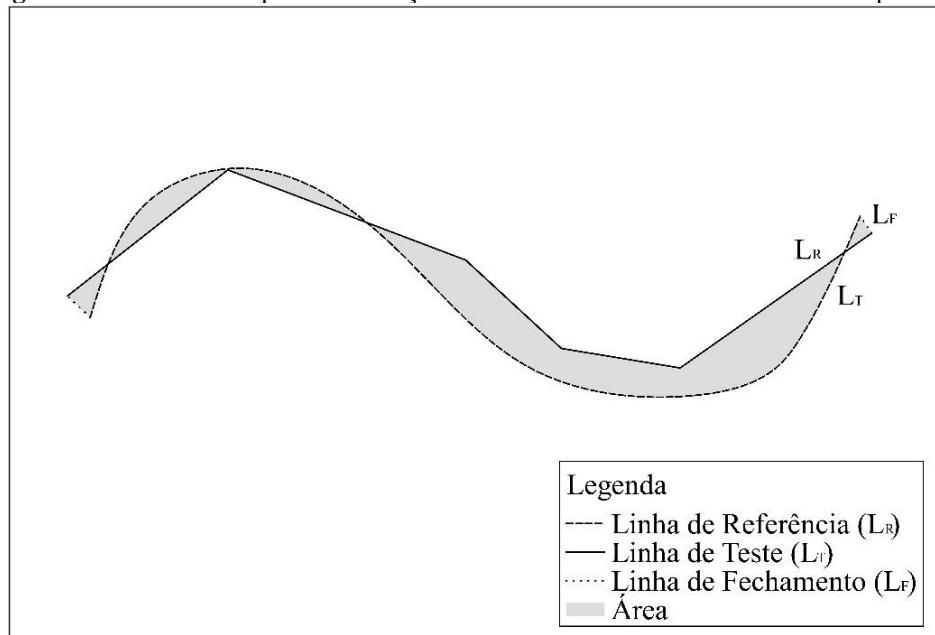
Uma forma de representar a incerteza posicional, correspondentes a entidades lineares ou a fronteiras de regiões, consiste em considerar que estas têm uma espessura que representa a zona onde a linha com sua posição de referência se deve localizar, a partir desse pressuposto temos o método da Banda Épsilon (ZANETTI, 2016). No Brasil, esse método é conhecido também como Método das Áreas, segundo Galo et al. (2001). O método tem como objetivo gerar uma medida de discrepância posicional entre duas feições analisadas, através da razão entre a área formada pela sobreposição de duas linhas e o comprimento da linha de teste.

A Banda Épsilon é um modelo de erro determinístico que assume que a discrepância é uniforme em largura e que a linha tida como referência se localiza dentro da região dessa banda (TONG et al., 2013). Na Figura 5 pode-se verificar a geração da área de discrepância posicional

pela sobreposição das linhas de teste e referência, onde aplicando a Equação 1, teremos o erro posicional entre esses, conhecido como Banda de Erro Épsilon.

$$\varepsilon = \frac{\sum A}{L_T} \quad (1)$$

Figura 5 - Forma de comparar duas feições lineares através do método da Banda Épsilon.



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2015).

3.7.2 Distância de Hausdorff

A Distância de Hausdorff representa a medida de quão distantes dois conjuntos de pontos, presentes em um espaço, estão entre si (SANTOS, 2016). Huttenlocher (1990) atribui a Distância de Hausdorff como a máxima distância entre as distâncias mínimas entre dois conjuntos finitos de pontos.

Quando o método é analisado em feições lineares exige-se que seja utilizada uma generalização através de seus vértices para aplicação, permitindo a viabilidade computacional, atingindo bons resultados em um tempo de processamento compatível (SANTOS, 2016). Esse método é muito sensível a erros provenientes de outliers, portanto, Mozas (2007), propôs que a distância mínima entre os conjuntos deveria ser dada pela média das distâncias e não pela máxima (Equações 2 e 3), evitando erros grosseiros ou ruídos presentes nos dados analisados.

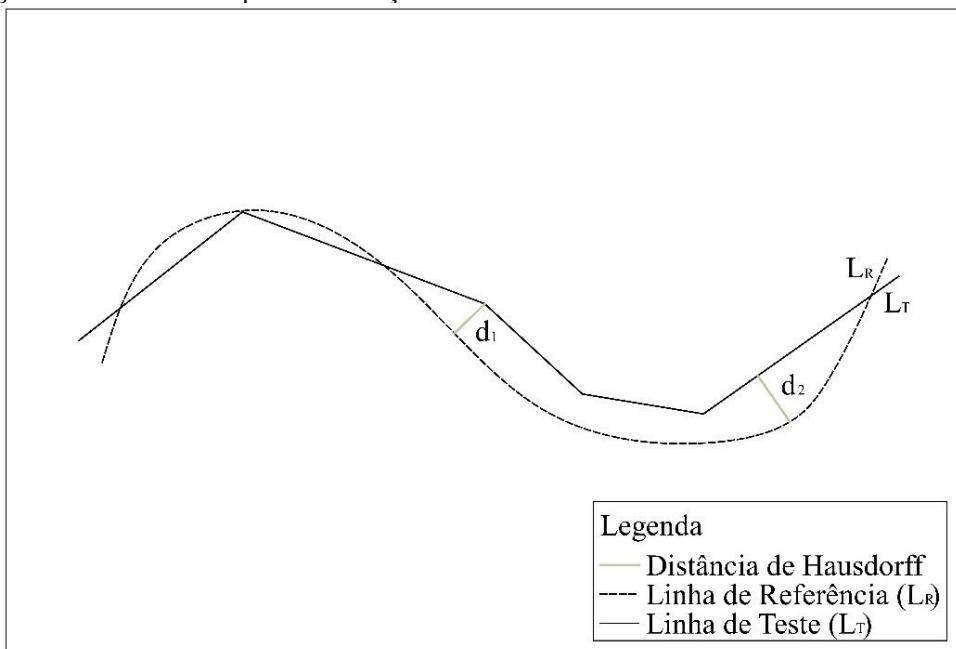
$$d_1 = \frac{\sum_{i=1}^n d_{1i}}{n} \quad (2)$$

$$d_2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_{2i}}{n} \quad (3)$$

A Distância de Hausdorff (DH) é dada, portanto, pela Equação 4. A Figura 6, expõe a comparação de duas feições lineares para obtenção da Distância de Hausdorff.

$$DH = \max(d_1, d_2) \quad (4)$$

Figura 6 - Forma de comparar duas feições lineares através do método da Distância de Hausdorff



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2015).

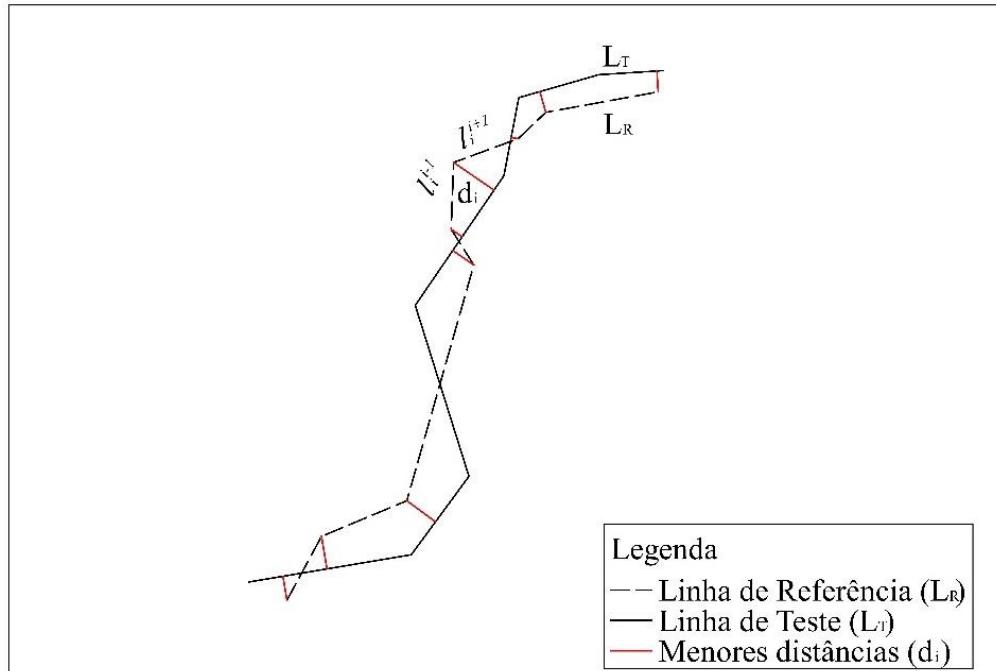
3.7.3 Influência do Vértice

Mozas e Ariza (2011) propõem que a avaliação planimétrica entre linhas deve ser realizada dando a devida atenção à importância dos vértices que definem as linhas, onde cada vértice tem uma posição determinada que envolve os segmentos adjacentes. Nesse sentido, um deslocamento curto em um vértice afeta apenas os dois segmentos adjacentes e não o restante da linha. Já um deslocamento longo provavelmente afetará muitos segmentos, tendo maior influência no seu erro posicional. Ainda segundo os autores, o método da Influência do Vértice é baseado na medição da distância euclidiana dos vértices da linha de referência até à linha de teste. Essas distâncias são ponderadas em função do comprimento dos segmentos adjacentes ao vértice. Assim, pode-se obter um valor ponderado para a linha com mais precisão. Para o conjunto de segmentos calcula-se uma média aritmética ponderada usando o comprimento das

linhas para obter o valor de discrepância média posicional, através da Equação 5, exemplificada na Figura 7, apresentando a comparação entre duas linhas e cada variável presente na equação.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n [d_i(l_i^{i-1} + l_i^{i+1})]}{2L_R} \quad (5)$$

Figura 7 - Forma de comparar duas feições lineares através do método da Influência do Vértice.



Fonte: Adaptado de Mozas e Ariza (2011).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as áreas de estudo, assim como os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho.

4.1 Área de estudo

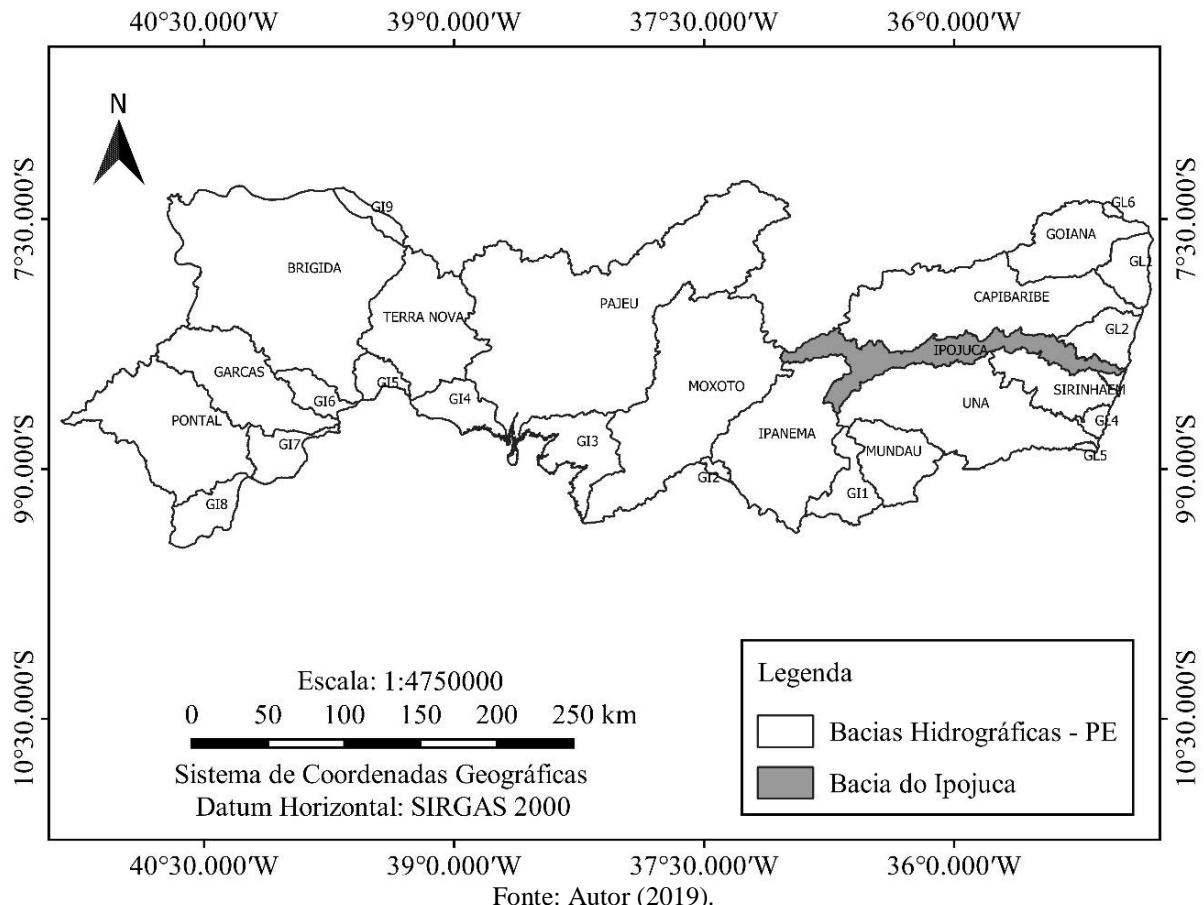
A área de estudo consiste na bacia hidrográfica do Ipojuca e nas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada, escolhidas por serem cidades cortadas pelo rio Ipojuca, que tiveram levantamento LiDAR pelo PE3D em escala 1:1.000 e por apresentarem trecho do rio com pouca presença de eutrofização, que impediria o processo de visualização e determinação desses.

4.1.1 Bacia do Ipojuca - Localização

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca localiza-se em sua totalidade no Estado de Pernambuco, entre as latitudes 08° 09' 50" e 08° 40' 20" Sul, e entre as longitudes 34° 57' 52" e 37° 02' 48" Oeste, constituindo a Unidade de Planejamento Hídrico UP3 do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH/PE. Entre seus confrontantes estão as bacias dos rios Una e Sirinhaém, ao sul, a bacia do Capibaribe e o Estado da Paraíba, ao norte, segundo e terceiro grupo de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos - GL2 e GL3 e o oceano Atlântico, a leste e por fim as bacias dos rios Ipanema e Moxotó e o Estado da Paraíba, a oeste (APAC, 2019).

A bacia do Ipojuca tem uma área de aproximadamente 3.435 km² e abrange 25 municípios, onde 14 possuem suas sedes inseridas na bacia (Arcoverde, Poção, Sanharó, Belo Jardim, Tacaimbó, São Caitano, Caruaru, Bezerros, Gravatá, Chã Grande, Escada, Pombos, Primavera e Ipojuca) e 11 estão parcialmente inseridos (Pesqueira, Alagoinha, Venturosa, São Bento do Una, Cachoeirinha, Altinho, Agrestina, Riacho das Almas, Sairé, Amaraji e Vitória de Santo Antão). Seu rio principal percorre um trajeto de aproximadamente 320 km até o oceano Atlântico, cortando diversas sedes municipais como Tacaimbó, São Caitano, Caruaru, Bezerros, Gravatá, Chã Grande, Escada, Primavera e Ipojuca (APAC, 2019). A localização da bacia é exposta na Figura 8.

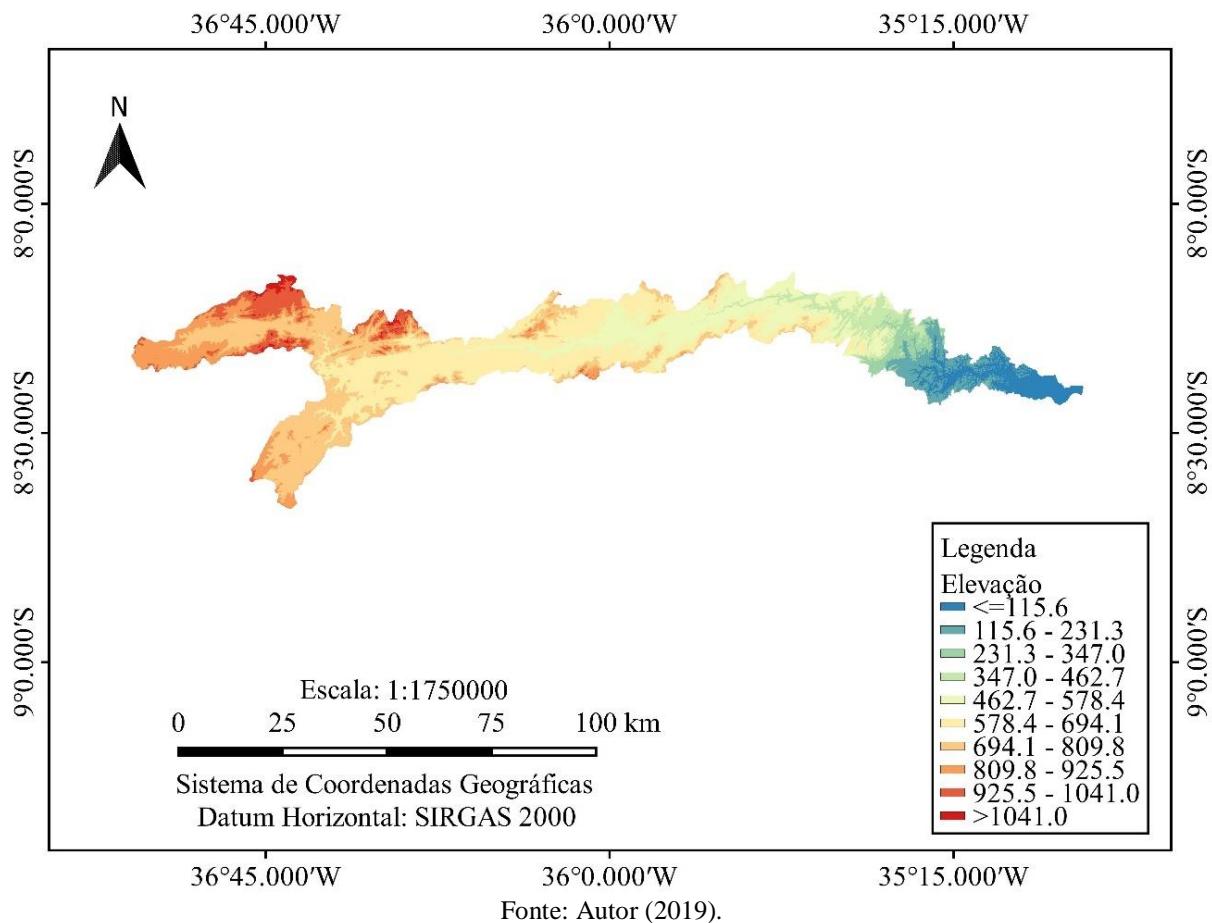
Figura 8 - Localização das bacias hidrográficas de Pernambuco: Destaque para a bacia do Ipojuca.



Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Relevo

A bacia apresenta planície costeira com altitudes sempre inferiores a 100 metros, e em maior parte de sua área encontra-se o planalto da Borborema, cerca de 70% de sua área total, tendo seu início nas proximidades do município de Chã Grande (PERNAMBUCO, 2005). O mapa de altitude para a bacia hidrográfica do Ipojuca é representado na Figura 9, gerado a partir do Modelo Digital de Terreno na escala de 1:5.000 do PE3D e a partir dessa obteve-se uma altitude máxima registrada de aproximadamente 1.157 m.

Figura 9 - Relevo da bacia do Ipojuca.

4.1.3 São Caetano

Com uma área de aproximadamente 383 km², o município de São Caetano localiza-se na Mesorregião do Agreste de Pernambuco e Microrregião do Vale do Ipojuca, entre as latitudes 8°29'00" e 8°11'00" Sul e longitudes 36°14'00" e 36°04'00" Oeste. O município é delimitado a norte pelos municípios de Caruaru, Brejo da Madre de Deus, ao sul por Altinho, a oeste por Cachoeirinha e Tacaimbó e a leste por Caruaru. Dentre seus principais acessos está a BR-423 e BR-232. Segundo estimativa do IBGE (2019), o município tinha uma população para 2018 de 37.119 pessoas. A localização do município pode ser evidenciada na Figura 10.

4.1.4 Caruaru

Apresentando uma área de 932 km², o município de Caruaru localiza-se na Mesorregião do Agreste de Pernambuco e Microrregião do Vale do Ipojuca, entre as latitudes 08°24'00" e 7°58'00" Sul e longitudes 35°51'00" e 36°10'30" Oeste. Seu território é limitado ao norte pelos

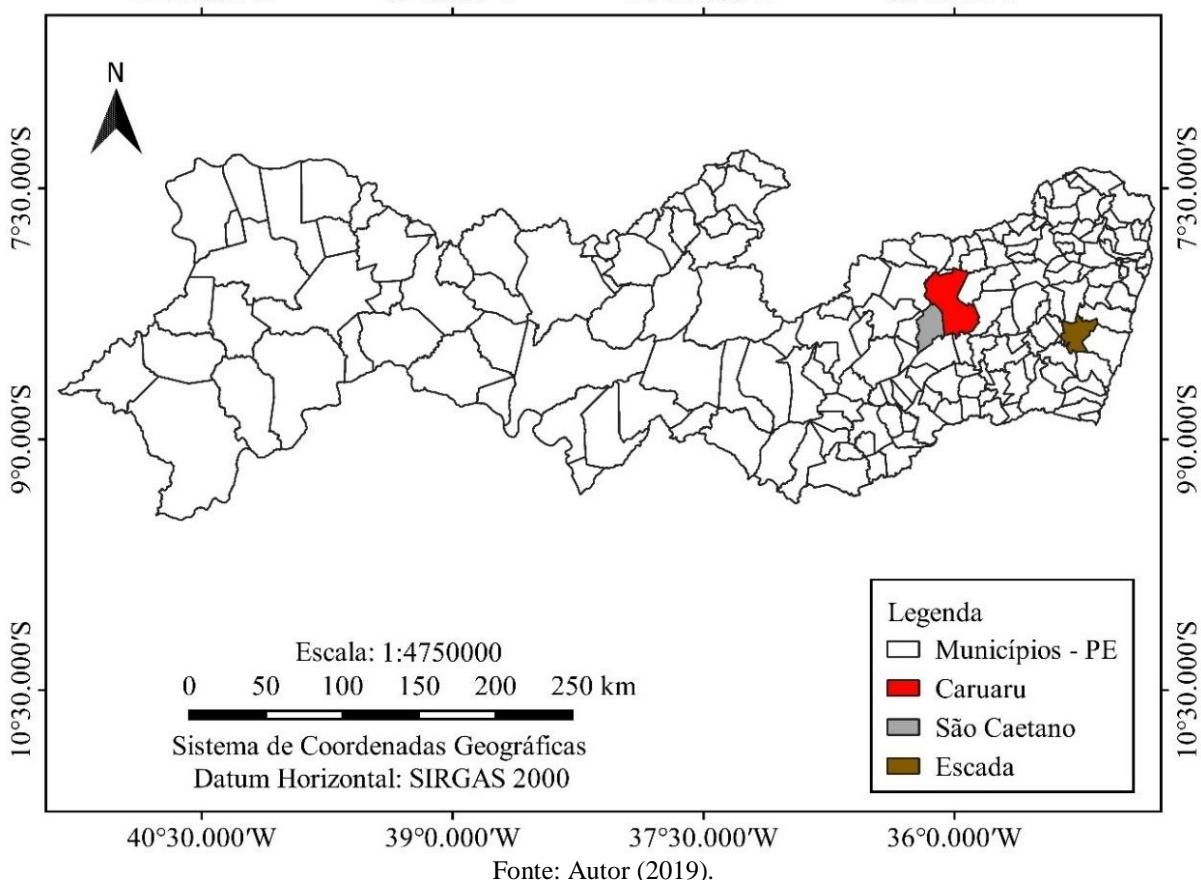
municípios de Toritama, Taquaritinga do Norte, Vertentes e Frei Miguelinho, ao sul, por Altinho e Agrestina, a leste com Bezerros e Riacho da Almas e a oeste com São Caetano e Brejo da Madre de Deus. Dentre seus principais acessos está a BR-232, BR-103, PE-095 e PE-145. Segundo IBGE (2019), a população estimada para Caruaru em 2018 era de 356.872 pessoas. A localização para o município pode ser evidenciada na Figura 10.

4.1.5 Escada

Escada possui uma área municipal de 347 km², localizado na Mesorregião da Mata Pernambucana, na Microrregião da Mata Meridional, entre as latitudes 8°14'00" e 8°29'30" Sul e longitudes 35°08'00" e 35°22'00" Oeste. Tendo como confrontantes os municípios de Cabo de Santo Agostinho, Vitória de Santo Antão ao norte, Ribeirão e Sirinhaém ao sul, Primavera e Ribeirão a oeste e o município do Ipojuca a leste. Seus principais acessos são a BR-101, PE-051 e PE-045. Sua população estava estimada em 68.448 para o ano de 2018, segundo o IBGE (2019). A localização para o município pode ser evidenciada na Figura 10.

Figura 10 - Municípios de Pernambuco: Destaque para os municípios de São Caetano e Escada.

40°30.000'W 39°0.000'W 37°30.000'W 36°0.000'W



4.2 Recursos Tecnológicos

O trabalho foi realizado em Notebook com processador Intel® core™ i7, com placa de vídeo dedicada de 1050 GTX, memória instalada de 16GB e Sistema Operacional de 64 bits, utilizando *softwares* da ESRI: ArcGIS Pro, versão de teste.

4.3 Obtenção da rede hídrica da bacia do Ipojuca

4.3.1 Algoritmos do Archydros

No presente estudo foi utilizado o complemento ArcHydros, devido à maior eficiência do ArcGIS no processamento de dados de alta densidade espacial. A ferramenta ArcHydros fornece uma estrutura capaz de organizar e pré-processar dados geoespaciais e temporais em um sistema de informações geográficas para utilizá-los em modelos de simulação hidrológica e hidráulica (MAIDMENT, 2002). Strassberg (2004) afirma que o modelo de dados do ArcHydros se compõe de uma conceituação dos sistemas de escoamentos superficiais e é capaz de descrever cursos de redes fluviais, delimitações de bacias hidrográficas e canais.

O processo de aquisição de rede hidrográficas pelo ArcHydros é realizada por uma série de algoritmos presentes na sua base de ferramentas. Os algoritmos utilizados na ferramenta ArcHydros para essa finalidade são:

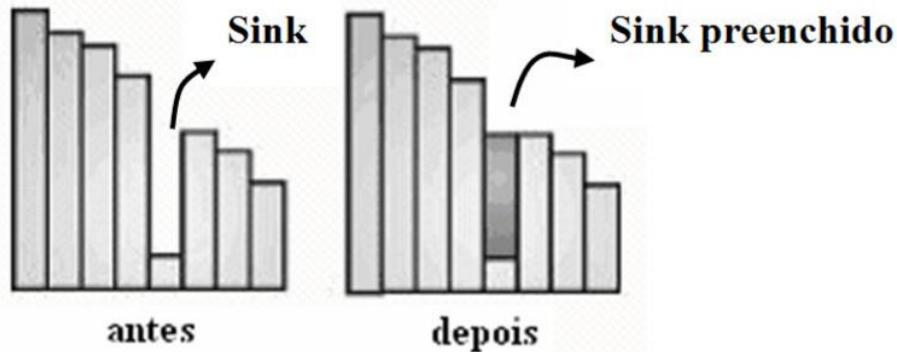
- I. *Fill Sinks;*
- II. *Flow Direction;*
- III. *Flow Accumulation;*
- IV. *Stream Definition;*
- V. *Stream Segmentation;*
- VI. *Drainage Line Processing.*

4.3.1.1 *Fill Sinks*

Mendes e Cirilo (2013), afirmam que os *sinks* ou depressões representam obstáculos à determinação das direções de fluxo, já que, ocorrendo em um pixel onde todos os seus vizinhos são mais altos, surge então, momentaneamente, a impossibilidade de definição do sentido de fluxo. Os MDTs e MDEs normalmente apresentam depressões de origem artificial, como erros nos processos de obtenção, ou natural, como lagos ou sumidouros.

O processamento dos modelos digitais no ArcHydros para a obtenção das direções de fluxo só é possível quando ocorre a eliminação dos *sinks*. Portanto, é o primeiro passo no estudo de drenagem da bacia. Um exemplo de preenchimento de um *sink* é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Preenchimento dos *sinks*.



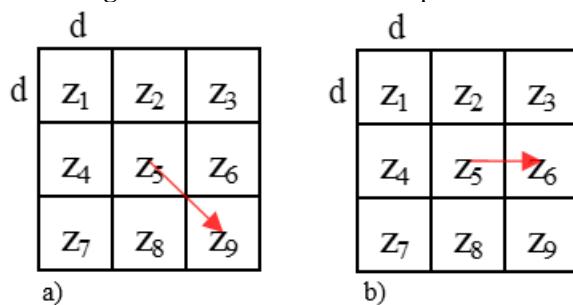
Fonte: Sobrinho et al. (2010)

4.3.1.2 Flow Direction

As direções de fluxo baseadas em modelos digitais são necessárias para determinar, na hidrologia, os caminhos nos quais há o movimento de água, sedimentos e contaminantes (TARBOTON, 1997). Partindo da premissa que a água sempre flui em declive, a finalidade do *flow Direction* é montar uma grade digital onde, para cada pixel será atribuído um valor referente a direção para qual a água escoará.

Para o presente estudo foi aplicado o modelo do Algoritmo Determinístico 8 (D8), apresentado desenvolvido por Tarboton (1997), onde é possível atribuir a direção de escoamento de um pixel avaliando um de seus oito vizinhos, com base na diferença de cota ponderada pela distância entre eles (BOSQUILIA, 2013). A Figura 12 demonstra a declividade do pixel.

Figura 12 - Declividade de um pixel.



Fonte: Adaptado de Furnans (2001).

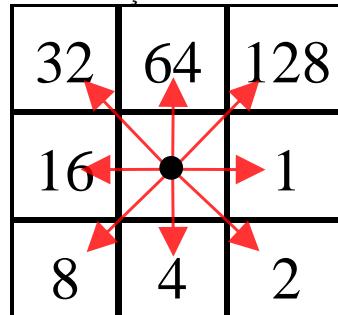
Tomando como base a Figura acima, d representa as dimensões do pixel. a declividade (I) é calculada em pixels nas direções cardinais pela diferença entre as cotas pela distância entre os centros dos pixels d (Equação 6), já nas direções colaterais a distância entre os pixels é dada por $d\sqrt{2}$ (Equação 7).

$$I = \frac{z_5 - z_6}{d} \quad (6)$$

$$I = \frac{z_5 - z_9}{d\sqrt{2}} \quad (7)$$

ESRI (2019) apresenta os seguintes valores para as direções possíveis: 1 – leste; 2 – sudeste; 4 – sul; 8 – sudoeste; 16 – oeste; 32 – nordeste; 64 – norte; e 128 – noroeste (Figura 13). Com isso uma matriz com a preferência de fluxo para cada pixel é formada.

Figura 13 - Direções de fluxo de um pixel.



Fonte: Adaptado de ESRI (2019).

A grade de altitude dar origem a uma nova grade com as direções de fluxo para cada pixel presente no modelo digital. ESRI (2019) demonstra um exemplo de geração da grande numérica de fluxo, demonstrado na Figura 14. A Figura 14a, contém os valores de elevações e a Figura 14b a grade de fluxo resultante.

Figura 14 - Grade de fluxo

76	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16

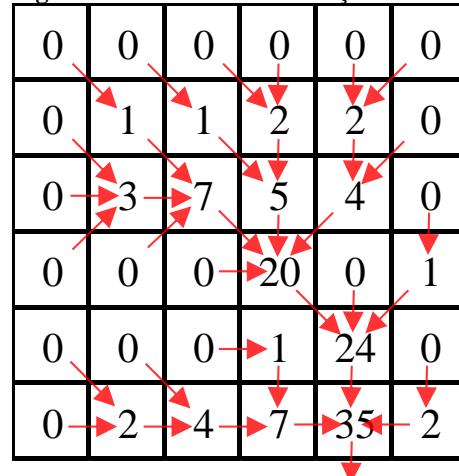
a)

b)

Fonte: Adaptado de ESRI (2019).

4.3.1.3 Flow accumulation

A partir da grade de direção de fluxo, pode-se obter uma nova grade na qual armazena o número de pixel que drenam para outro pixel vizinho (Figura 15) e é portanto, uma medida de quão distante o pixel está da fonte de água, tratando-se ainda de uma medida relativa do fluxo que pode-se acumular em cada célula (FURNANS, 2001). Células de saída com alto acúmulo de fluxo são áreas de fluxo concentrado e podem ser usadas para identificar canais de fluxo, já células de saída com uma acumulação de fluxo de zero são máximas topográficas locais e podem ser usadas para identificar cordilheiras (ESRI, 2019).

Figura 15 - Grade de acumulação de fluxo

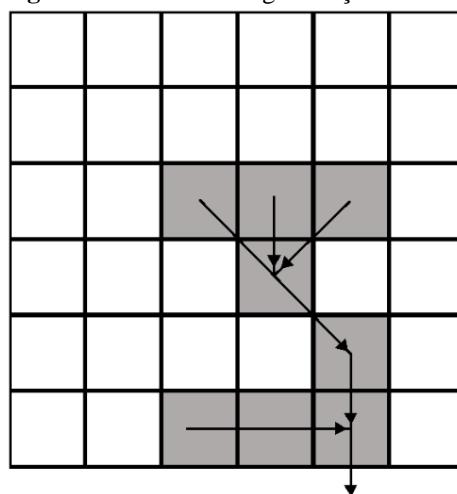
Fonte: Adaptado de ESRI (2019).

4.3.1.4 Stream definition

Os fluxos podem ser definidos através do uso de um valor limite aplicado à grade de acumulação de fluxo, esse valor é fornecido pelo usuário e cria uma grade com valor 1 para todos pixels que possuir valor igual ou maior na acumulação de fluxo, que o cedido pelo usuário (FURNANS, 2001; BOSQUILA, 2013). A escolha de um valor baixo resultará em uma rede de fluxo mais densa e um maior valor resultará em uma rede de fluxo menos densa.

Considerando a grade de acumulação de fluxo da Figura 15 e aplicando o valor de entrada como sendo 4, resultará no seguinte segmento de linha (Figura 16):

Figura 16 - Grade de segmentação de fluxo



Fonte: Autor (2019).

4.3.1.5 Stream segmentation

As redes de fluxo criadas podem ser divididas em segmentos distintos, pelo *stream segmentation*, onde cada pixel receberá um valor específico para o segmento a que pertence. O pixel que se encontra mais jusante em cada segmento é o ponto de exutório desse (FURNANS, 2001). A execução dessa etapa é essencial para a vetorização da rede de drenagem.

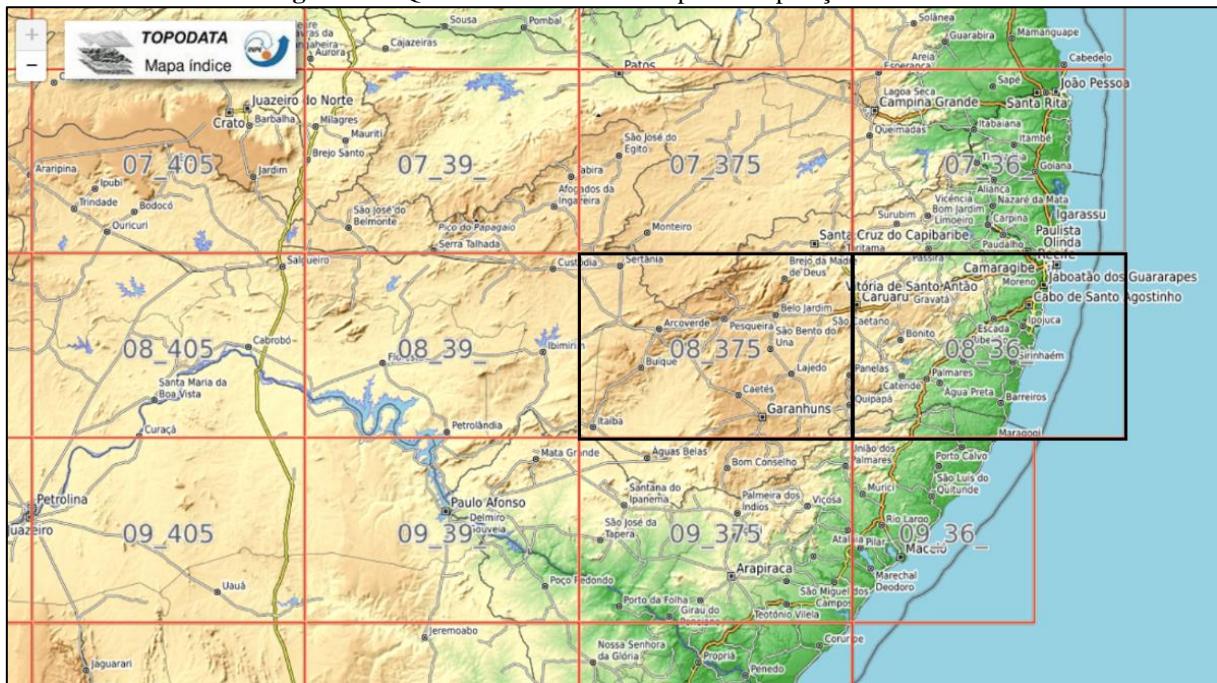
4.3.1.6 Dranaige Line Processing

A geração dos vetores de drenagem é criada pela função *Dranaige Line Processing*, que converte a grade de segmentação de fluxos em vetores lineares, gerando por fim, a rede de drenagem.

4.3.2 MDE 1:250.000

Os MDEs do TOPODATA possuem baixa densidade de dados quando comparados aos do PE3D: com apenas duas quadrículas foi gerado um mosaico capaz de abranger toda a área da bacia de estudo. As quadrículas utilizadas foram as 08S36_ZN e 08S375ZN, obtidas a partir do site do TOPODATA, como exposto na Figura 17. As quadrículas selecionadas estão marcadas em linha preta.

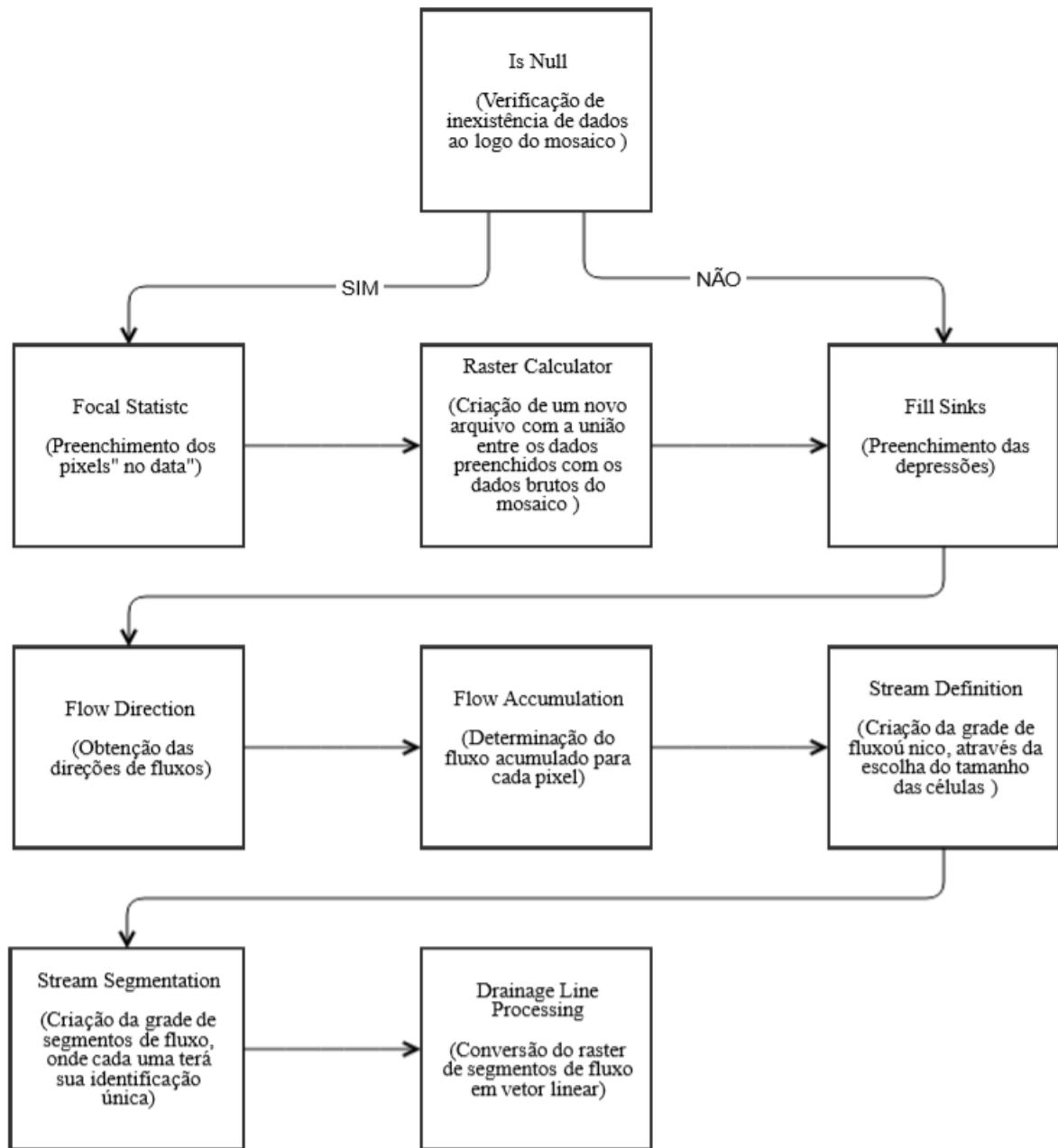
Figura 17 - Quadrículas selecionadas para composição da área da bacia.



Fonte: Adaptado de INPE (2019).

Com o arquivo *shapefile* da área da bacia e o uso de ferramentas de recorte presente no software ArcGIS, gerou-se o mosaico limitado pela bacia, o que originou um arquivo com tamanho de aproximadamente 6 Megabytes. A geração de sua rede hídrica foi realizada através de uma sequência de algoritmos presentes no ArcHydros. A Figura 18 demonstra o fluxograma com as etapas aplicadas, para verificação de falhas nos pixels do mosaico e aplicação dos algoritmos do ArcHydros. No caso do algoritmo *stream definition* a quantidade de células escolhida para definir um fluxo foi de 115 células, resultando em uma área de aproximadamente 1,0 km² para cada célula.

Figura 18 - Fluxograma de algoritmos para geração da rede hídrica.

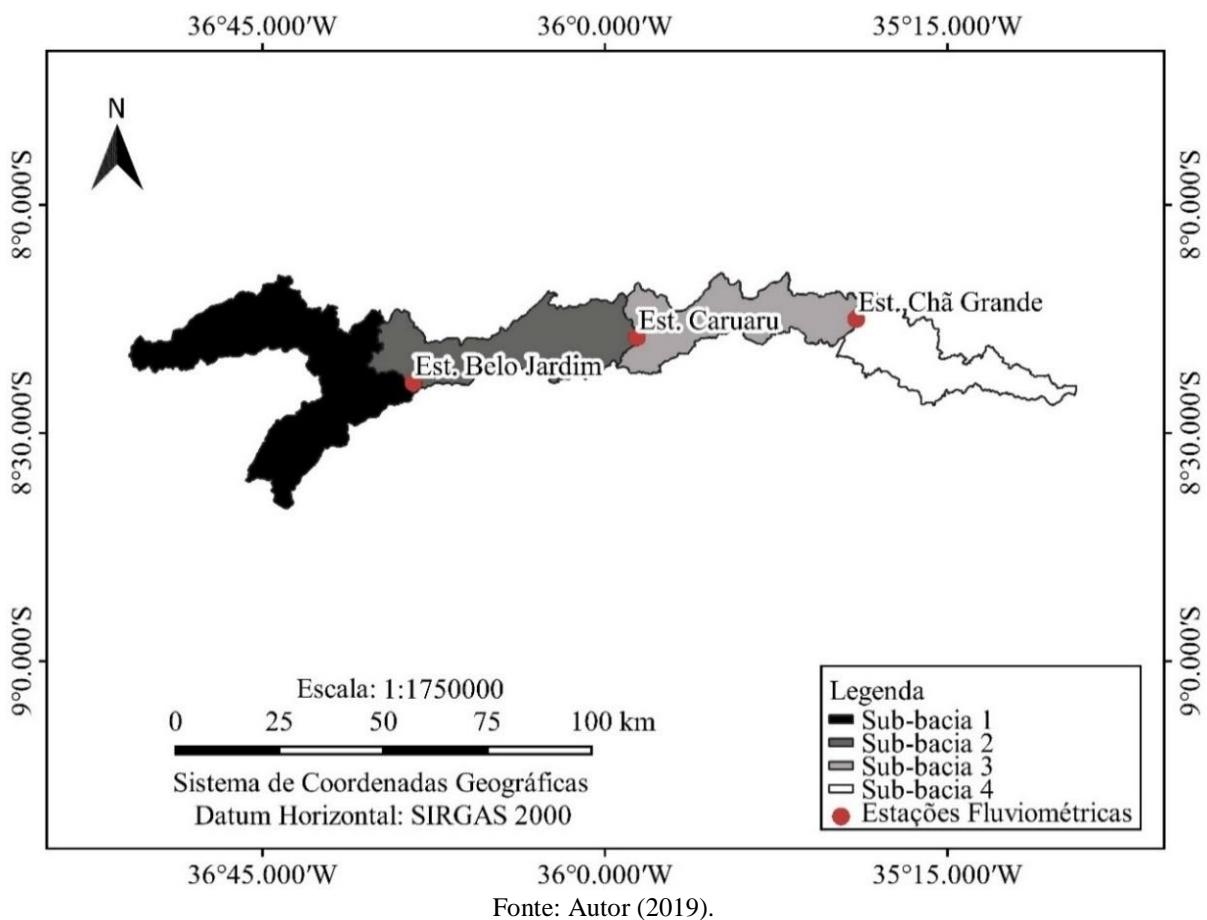


Fonte: Autor (2019).

A obtenção da rede hídrica inicialmente pelo TOPODATA se deu pela necessidade de obter sub-bacias para divisão do mosaico gerado pelos MDTs 1:5.000, uma vez que o uso da bacia completa nessa escala resultaria em um tempo de processamento extremamente superior, tornando-se inviável. Com a locação de algumas estações fluviométricas, os postos de Belo Jardim, Caruaru e Chã Grande foram demarcados como pontos para divisão da bacia. As coordenadas das estações fluviométricas foram obtidas do site da APAC (<http://www.apac.pe.gov.br/>). A obtenção dessas sub-bacias foi realizada através de

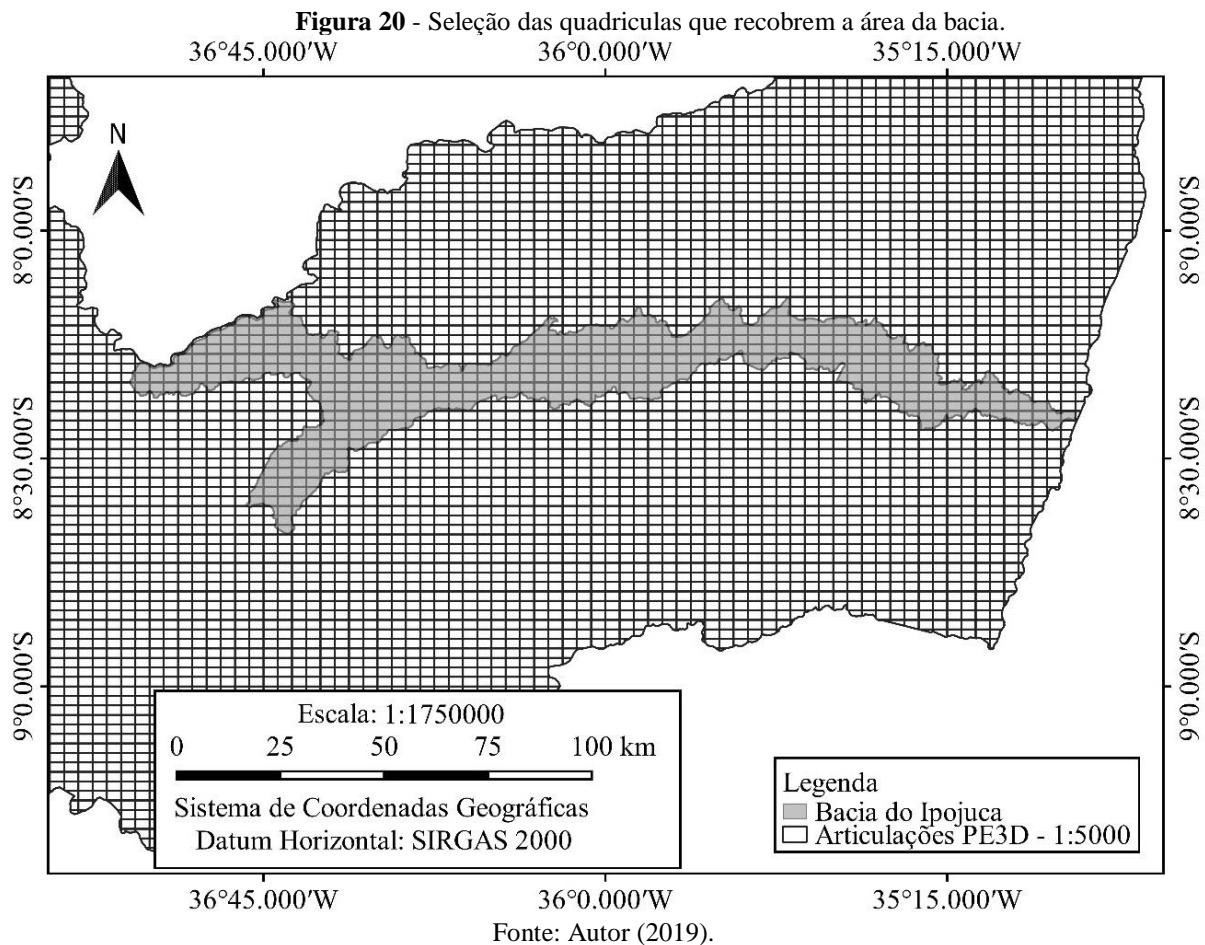
procedimentos que utilizaram ferramentas do ArcHydros. A Figura 19 representa as sub-bacias, assim como a locação das estações fluviométricas.

Figura 19 - Divisão da bacia em sub-bacias.



4.3.3 MDT 1:5.000

Para montar o mosaico da bacia em escala 1:5.000 foram necessários os arquivos *shapefiles* da área da mesma e das articulações do PE3D, de modo a determinar especificamente as quadrículas utilizadas para recobrir a área da bacia, como observado na Figura 20. Para cobrir a bacia do Ipojuca foram dispostas 576 quadrículas, que após a realização do mosaico e extração a área da bacia, deram origem a um arquivo de aproximadamente 11,5 Gigabytes.



Como os dados de MDT utilizados no referente estudo ainda não foram validados pelo ITEP, foi evidenciado na construção do mosaico em escala 1:5.000 a presença de quadrículas com alguns pixels “*no data*”, que não apresentam valores de altitude, decorrente a falhas de levantamento ou do processamento de dados para construção da quadrícula, como mostrado na Figura 21. Para evitar erros na geração da rede hídrica da bacia foram corrigidas essas falhas através de ferramentas de interpolação e união de dados. As etapas são o *Is Null*, *Focal Statistic* e *Raster Calculator* (Figura 18). Assim como no caso da rede gerada pelo MDE 1:250.000, foi escolhido o número de células que definiriam um fluxo no algoritmo *stream definition*. A quantidade de células escolhida foi de 1.000.000 células, para resultar na mesma área de aproximadamente 1,0 km² para a definição do fluxo.

Figura 21 - Quadrícula com pixels "no data".



Fonte: Autor (2019).

Após a correção dos pixels sem valores foram utilizados os arquivos *shapefiles* das divisões em sub-bacias para dividir o mosaico 1:5.000, com o objetivo de facilitar o processamento de dados e em cada divisão foram executados os algoritmos do ArcHydros apresentado na Figura 18.

4.4 Obtenção da rede hídrica local das três cidades

4.4.1 MDT 1:1000

Nas três cidades escolhidas para o comparativo da acurácia posicional das redes hidrográficas foram selecionadas as quadrículas na escala 1:1.000 que visualmente compuseram o trecho do rio do Ipojuca que corta a cidade. Com elas foram criados mosaicos e executados os algoritmos do ArcHydros, presentes na Figura 18. Em nenhum dos casos foram verificadas falhas nos mosaicos.

4.5 Aplicação dos métodos de acurácia

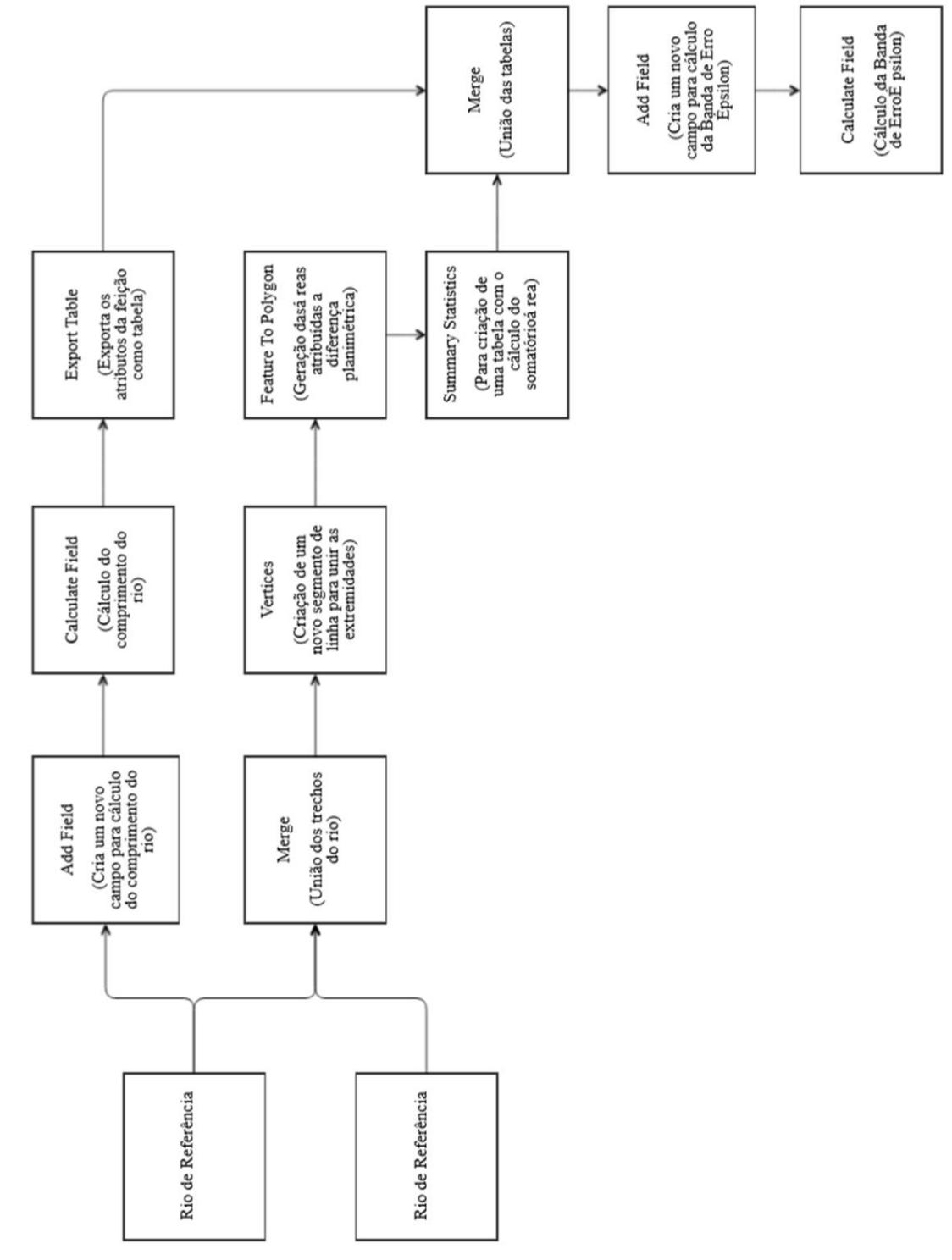
4.5.1 Banda de Épsilon

O método da Banda de Épsilon foi realizado gerando as áreas entre o rio de referência e os rios de teste obtidos pelos modelos digitais nas escalas 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000. Dentre as etapas para aplicação do modelo:

- I. Sobreposição das linhas do rio de referência e do rio de teste;
- II. Criação de um segmento de reta unindo as extremidades dos rios, para fechar o polígono formado pelas linhas, caso não coincidam;
- III. Geração do polígono formado pela sobreposição dos dois trechos;
- IV. Cálculo do somatório das áreas geradas pelo espaçamento entre os rios;
- V. Cálculo da Banda de Erro Épsilon (ε).

A Figura 22 apresenta o fluxograma com ferramentas do ArcGIS, utilizadas para a obtenção da Banda de Erro Épsilon gerada pela diferença posicional dos rios.

Figura 22 - Fluxograma de algoritmos aplicados para o método da Banda Epsilon.



Fonte: Autor (2019).

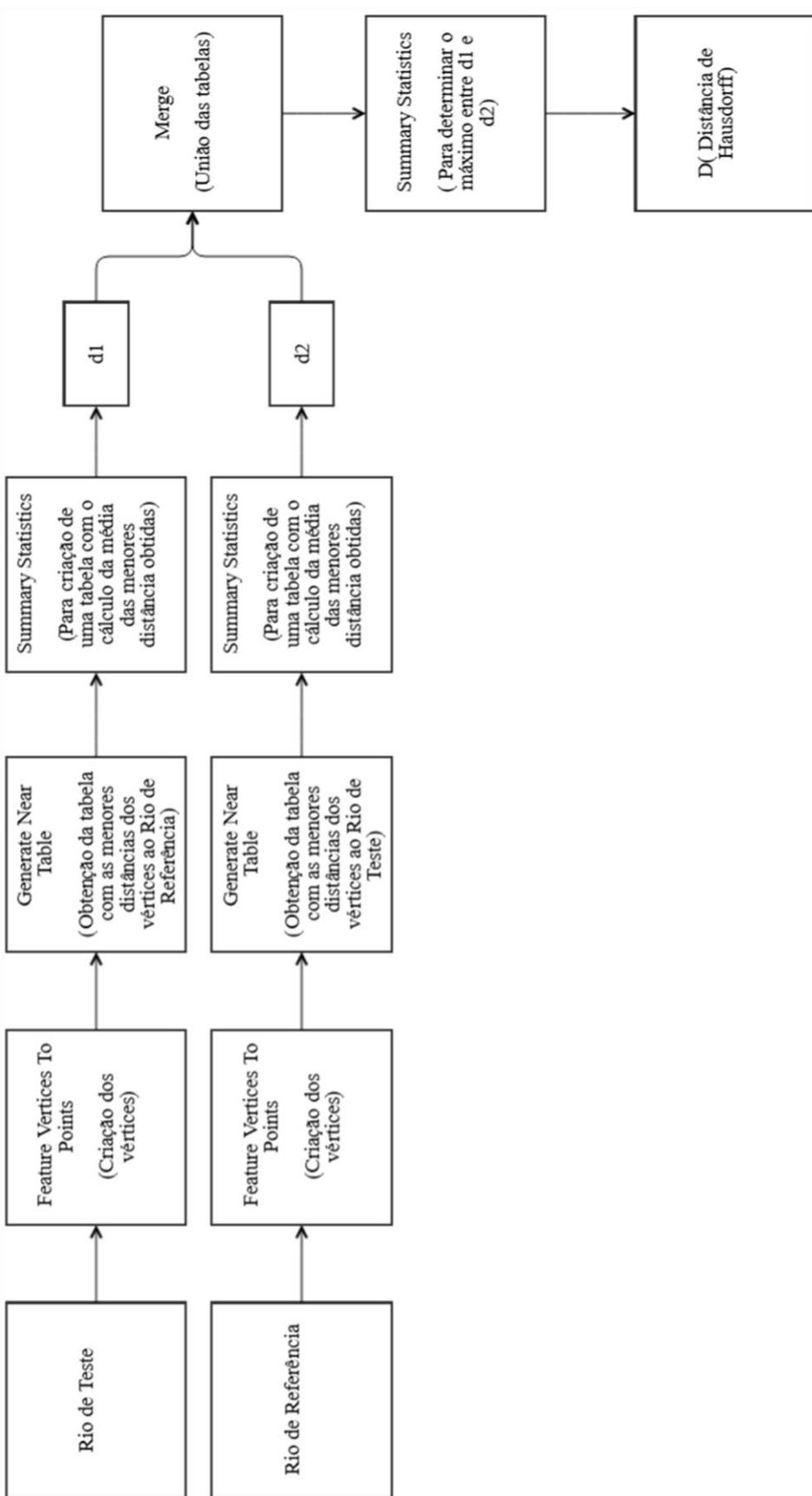
4.5.2 Distância de Hausdorff

No Método da Distância de Hausdorff, o procedimento de comparação entre o rio de referência e os rios de teste, visa obter uma máxima distância mínima entre esses, as quais foram obtidas com as seguintes etapas:

- I. Sobreposição das linhas do rio de referência e do rio de teste;
- II. Extração dos vértices dos rios de teste e de referência;
- III. Calcular a menor distância de cada vértice do rio de teste em relação ao rio de referência (d_1);
- IV. Calcular a menor distância de cada vértice do rio de referência em relação ao rio de teste (d_2);
- V. Obter a média para os valores de (d_1) e para os valores de (d_2);
- VI. A Distância de Hausdorff é definida pelo maior valor de d_1 e d_2 .

A Figura 23 apresenta o fluxograma com ferramentas do ArcGIS, empregadas para a obtenção da Distância de Hausdorff.

Figura 23 - Fluxograma de algoritmos aplicados para o método da Distância de Hausdorff.



Fonte: Autor (2019).

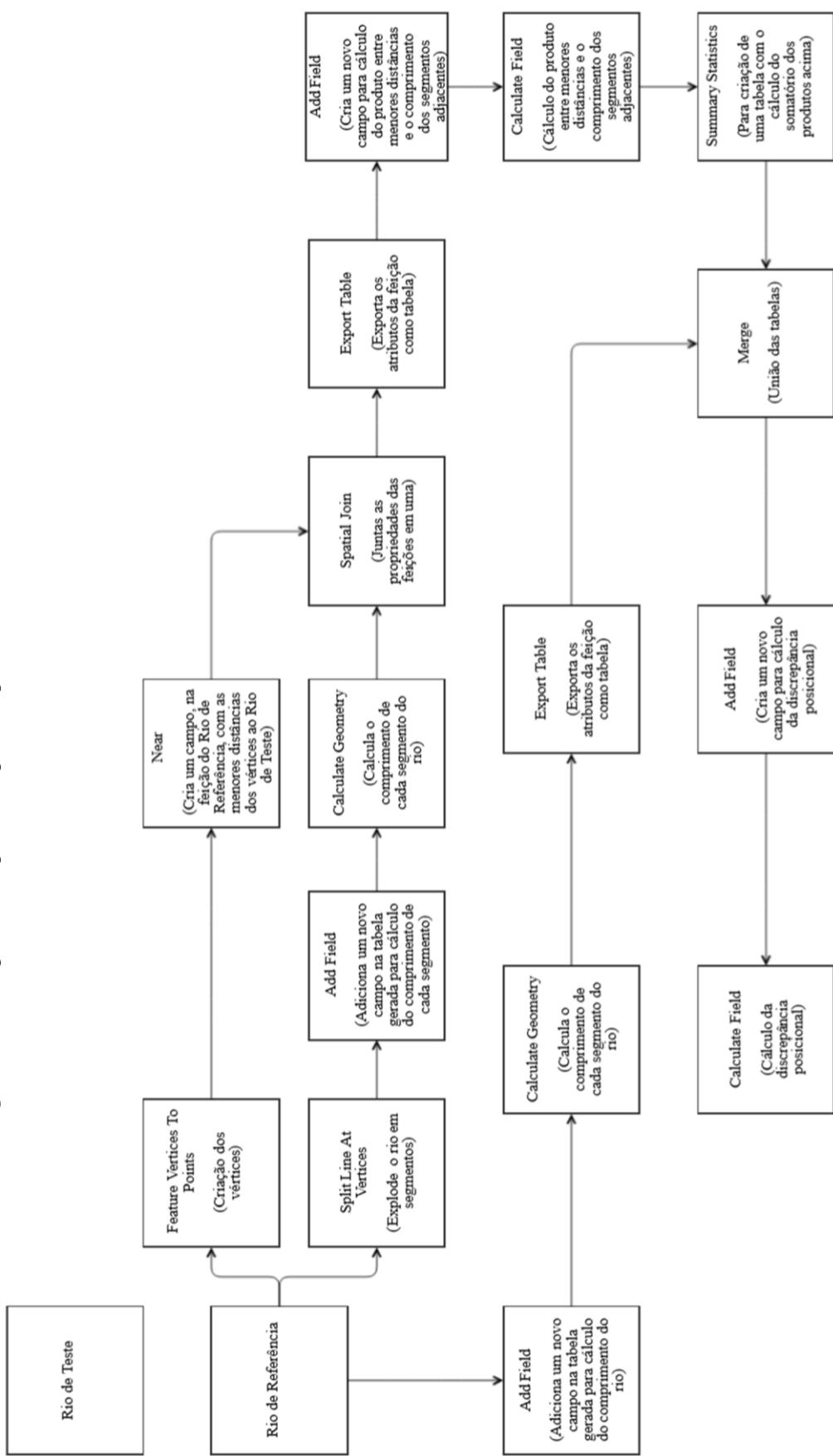
4.5.3 Influência do Vértice

No Método da Influência do Vértice, a comparação entre rio de referência e de teste, busca a obtenção da discrepância posicional entre esses e seu procedimento consiste em:

- I. Sobreposição das linhas do rio de referência e do rio de teste;
- II. Extração dos vértices do rio de referência;
- III. Calcular a menor distância de cada vértice do rio de referência em relação ao rio de teste;
- IV. Divisão do rio de referência em fragmentos;
- V. Cálculo do comprimento de cada segmento do rio de referência (l_i);
- VI. Cálculo da discrepância posicional média (D) (equação 9), relacionando cada distância mínima entre os vértices do rio de referência ao rio de teste (d_i) e seus segmentos adjacentes (l_i^{i-1} e l_i^{i+1}).

A Figura 24 apresenta o fluxograma com ferramentas do ArcGIS, empregadas para a obtenção da discrepância posicional dado pelo método da Influência do Vértice.

Figura 24 - Fluxograma de algoritmos aplicados para o método da Influência do Vértice.



Fonte: Autor (2019).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

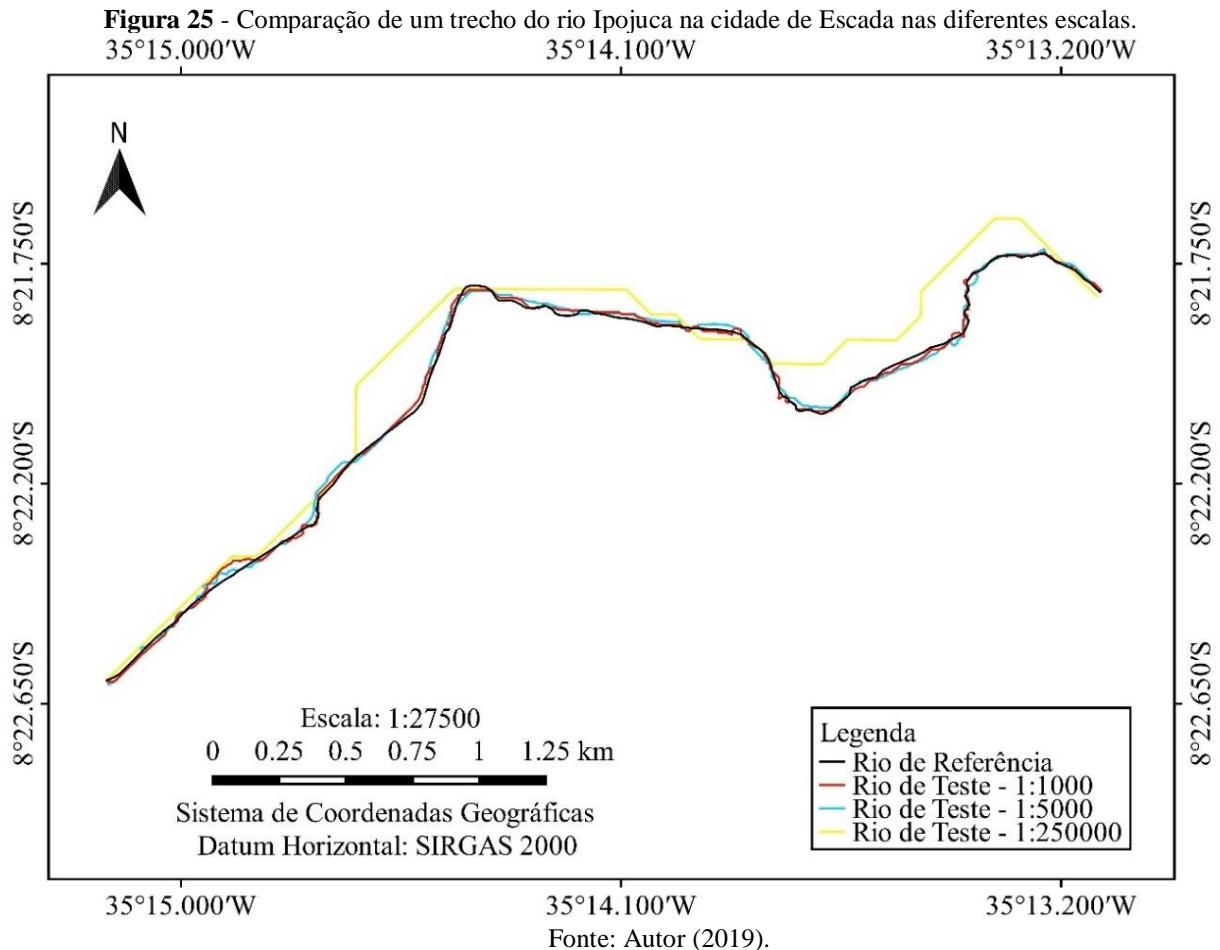
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a geração da rede hídrica da bacia do Ipojuca, bem como a comparação de trechos das redes geradas a partir dos modelos digitais em diferentes resoluções espaciais.

5.1 Construção do Rio de Referência

Com as ortoimagens do PE3D em escala 1:1.000 foram desenhados manualmente os trechos do rio Ipojuca que cortam as três cidades, levando em consideração o centro do fragmento, resultando em comprimentos de aproximadamente 2, 10 e 5 km, para as respectivas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada. O rio desenhado foi utilizado como referência para as análises de acurácia posicional, considerando que os produtos das ortoimagens possuem alta precisão cartográfica, uma vez que atendendo ao pressuposto da PEC-PDC classe A, apresentando erro máximo planimétrico de 0,28 m.

5.2 Filtragem dos rios

Para aplicação dos métodos de acurácia posicional, os rios devem apresentar unicamente o trecho de seu rio principal que corta a cidade. As redes geradas em resolução 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000 tiveram através de ferramentas de edição do ArcGIS seus afluentes apagados, assim como a maior parte do trecho principal do rio, ficando com pontos de início e fim perpendiculares ao primeiro e último da linha do rio de referência. Como exposto na Figura 25, o exemplo do resultado dessa edição para o trecho do rio em Escada.



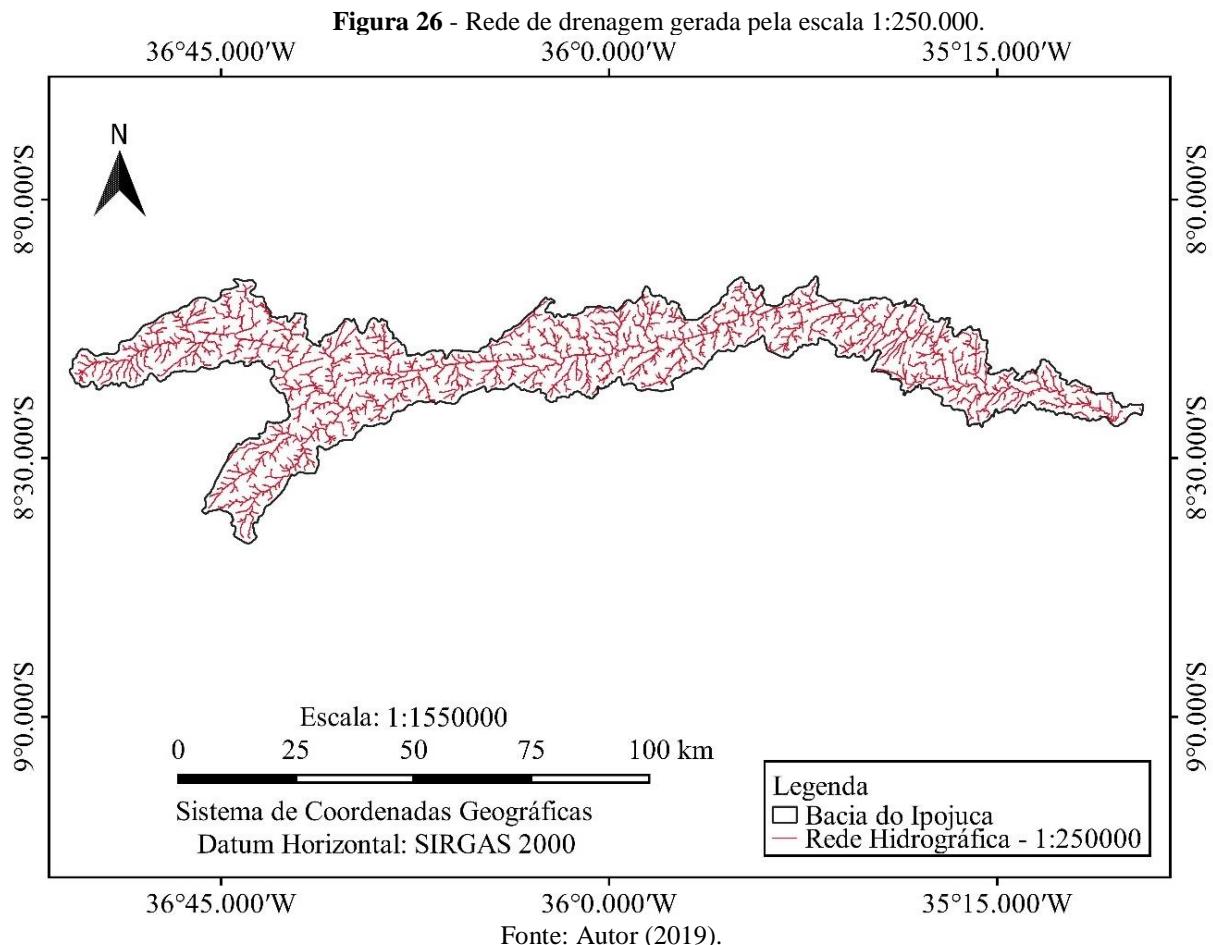
5.3 Geração da rede hídrica da bacia em 1:250.000

A utilização do MDE com escala de 1:250.000 para geração da rede hídrica da bacia do Ipojuca se deu de forma rápida e o tempo de execução de cada algoritmo utilizado do ArcHydros pode ser evidenciado na Tabela 3, enquanto a rede gerada pode ser visualizada na Figura 26.

Tabela 3 - Tempo de processamento dos algoritmos para bacia na escala 1:250.000.

Algoritmos do ArcHydros	Bacia do Ipojuca (s)
<i>Fill Sinks</i>	10
<i>Flow Direction</i>	8
<i>Flow Accumulation</i>	15
<i>Stream Definition</i>	1
<i>Stream Segmentation</i>	2
<i>Drainage Line Processing</i>	27
Total (hh:mm:ss)	00:01:03

Fonte: Autor (2019).



A rede com essa resolução apresenta problemas quanto a sua continuidade em relação ao seu exutório no oceano Atlântico, terminando antes mesmo de chegar no ponto de encontro.

5.4 Geração da rede hídrica da bacia em 1:5.000

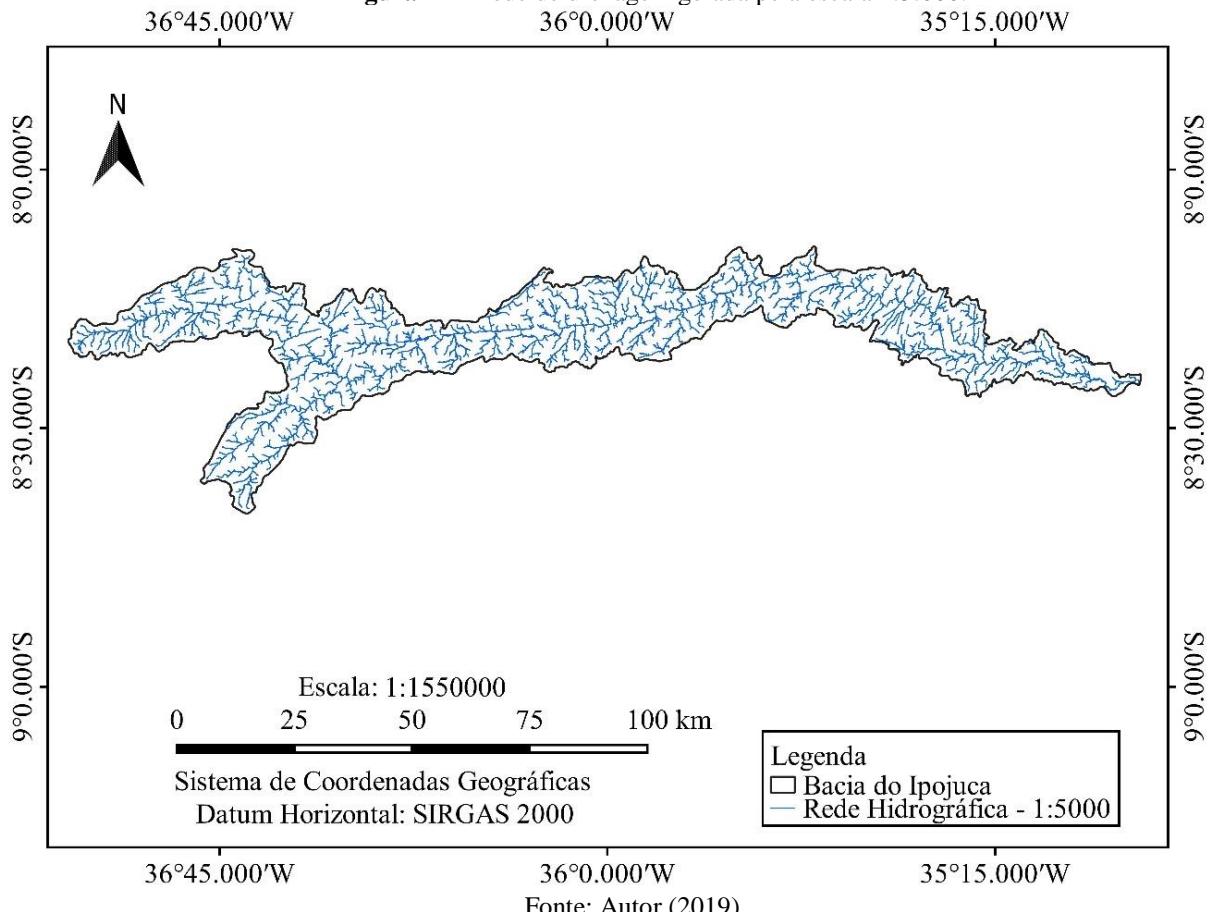
A determinação da rede hidrográfica a partir dos MDTs em escala 1:5.000 proveniente do PE3D foi um procedimento demorado quando comparado com a utilização dos MDEs do TOPODATA. Como indicado na Tabela 4, o tempo de processamento foi de 38 horas 45 minutos e 49 segundos, confirmando o que foi apresentado por Silveira (2000), ao afirmar que a resolução dos modelos digitais influí diretamente no tempo de processamento de dados.

Foi verificado em teste para a execução dos algoritmos que o tempo de processamento não apresenta uma relação linear com a área, portanto a utilização da bacia por completa no processamento poderia levar a tempos absurdamente maiores, tornando a obtenção da rede hídrica inviável. Na Figura 27 é apresentada a rede hídrica resultante.

Tabela 4 - Tempo de processamento dos algoritmos para bacia na escala 1:5.000.

Algoritmos do ArcHydros	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Sub-bacia 3	Sub-bacia 4
	(s)	(s)	(s)	(s)
<i>Fill Sinks</i>	17400	12600	6780	1998
<i>Flow Direction</i>	4380	1696	1152	670
<i>Flow Accmulation</i>	19380	16800	13020	7380
<i>Stream Definition</i>	795	710	549	165
<i>Stream Segmentation</i>	11520	9060	7320	5940
<i>Drainage Line Processing</i>	63	112	31	28
<i>Total para cada Sub-bacia</i>	53538	40978	28852	16181
<i>Total (hh:mm:ss)</i>	38:45:49			

Fonte: Autor (2019).

Figura 27 - Rede de drenagem gerada pela escala 1:5.000.

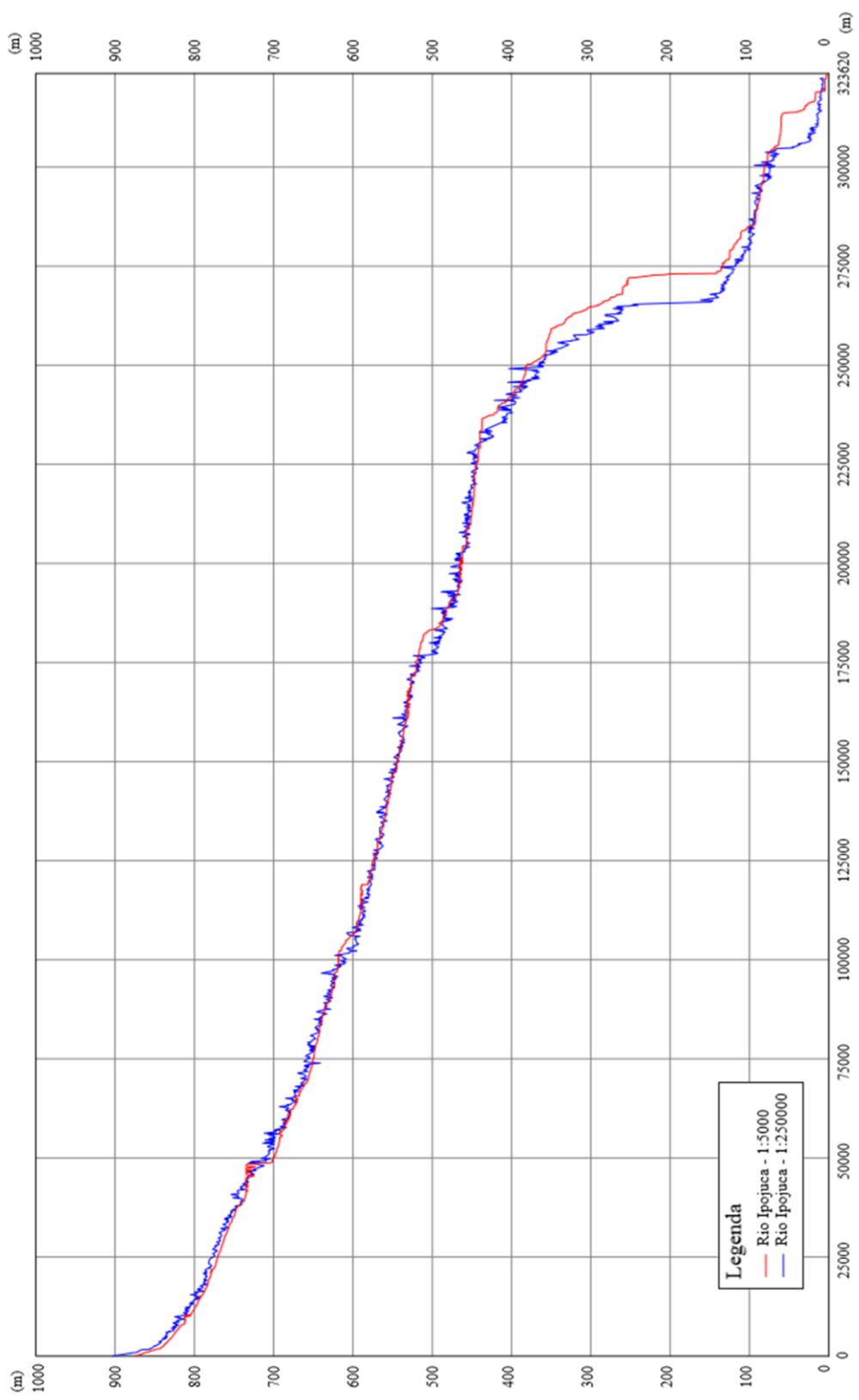
Fonte: Autor (2019).

5.5 Comparação de perfis do rio principal

Para o curso d'água principal, o rio Ipojuca teve gerado o seu perfil longitudinal completo, através dos modelos digitais em escala 1:5.000 e 1:250.000, como exposto na Figura 28. A escala vertical está 200 vezes maior que a escala horizontal. É importante verificar o padrão mais regular do perfil gerado pelo MDT do PE3D, sendo mais representativo ao terreno real. O MDE do TOPODATA apenas apresenta-se com cotas em valores inteiros, por conta da precisão.

A comparação dos perfis do rio Ipojuca obtidos pelos modelos nas duas escalas possibilitou concluir o efeito da resolução na altimetria, onde o perfil gerado pelo modelo em escala 1:250.000 apresentou ruídos com picos de elevação seguidos pontos baixos, em todo seu traçado. Já o perfil gerado pelo modelo em escala 1:5.000 apresentou melhor continuidade e suavidade quanto aos pontos de picos. A defasagem vista na comparação dos perfis a partir do quilômetro 225 é causado pela diferença planimétrica entre o rio gerado pelo MDE do TOPODATA e o MDT do PE3D, resultando em um rio principal com diferentes comprimentos, o que levaria a esse deslocamento entre os perfis.

Figura 28 - Comparação do perfil longitudinal do rio Ipojuca.

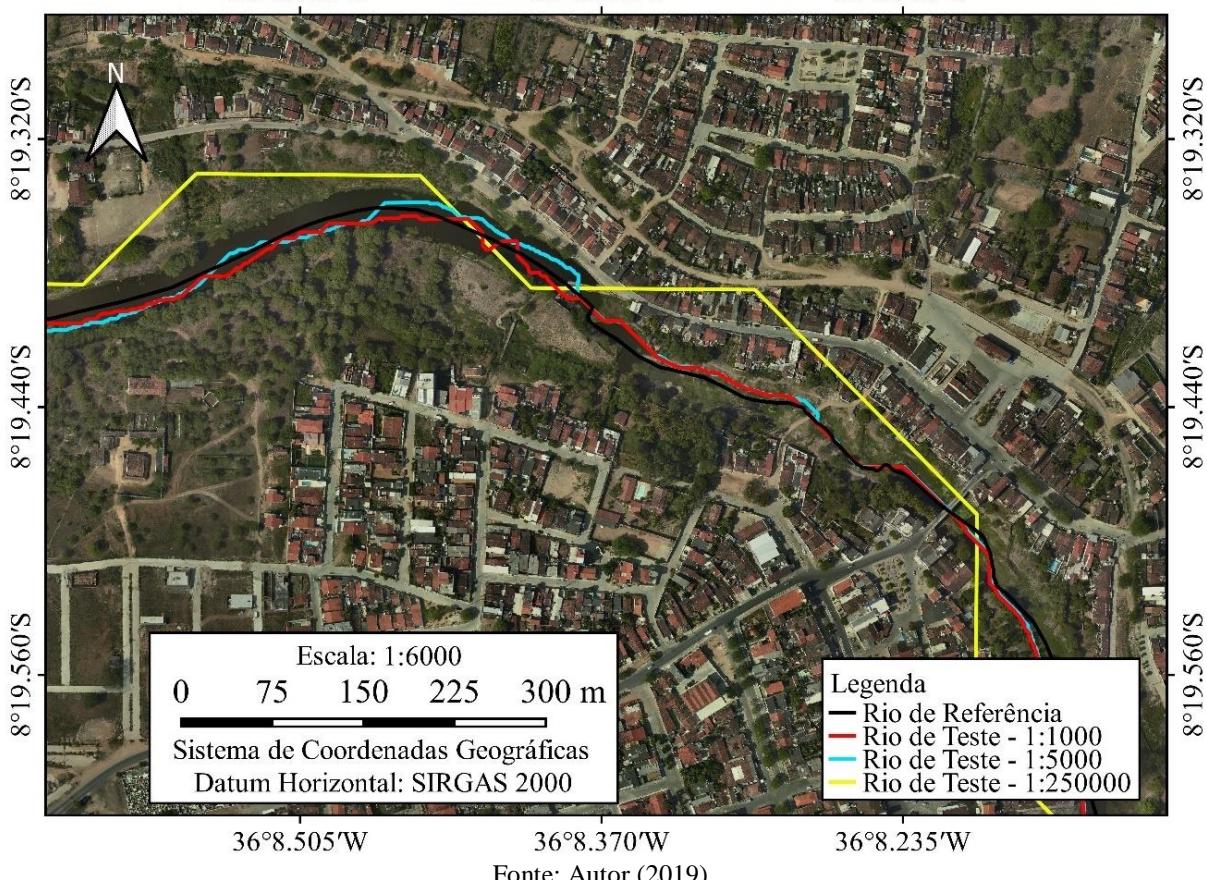


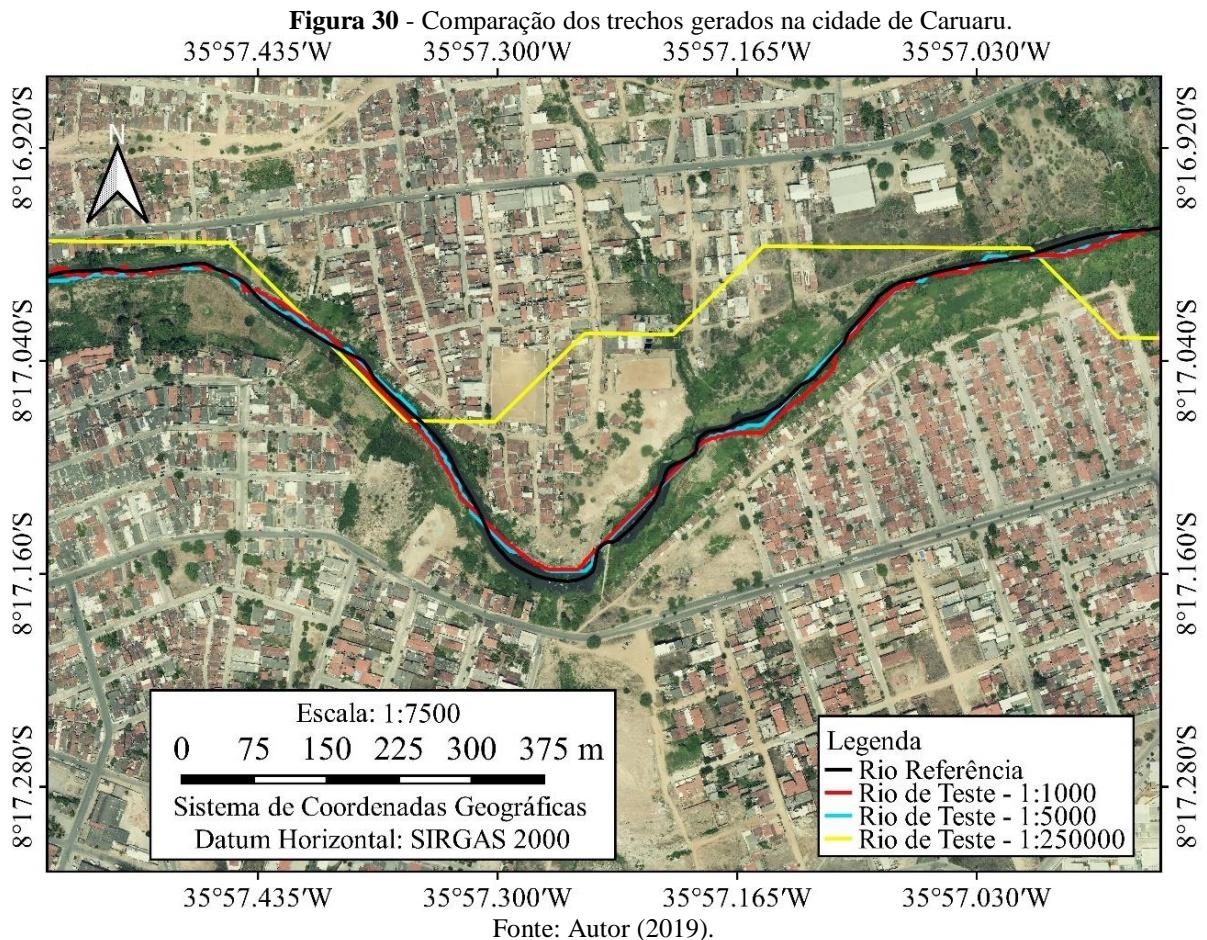
Fonte: Autor (2019).

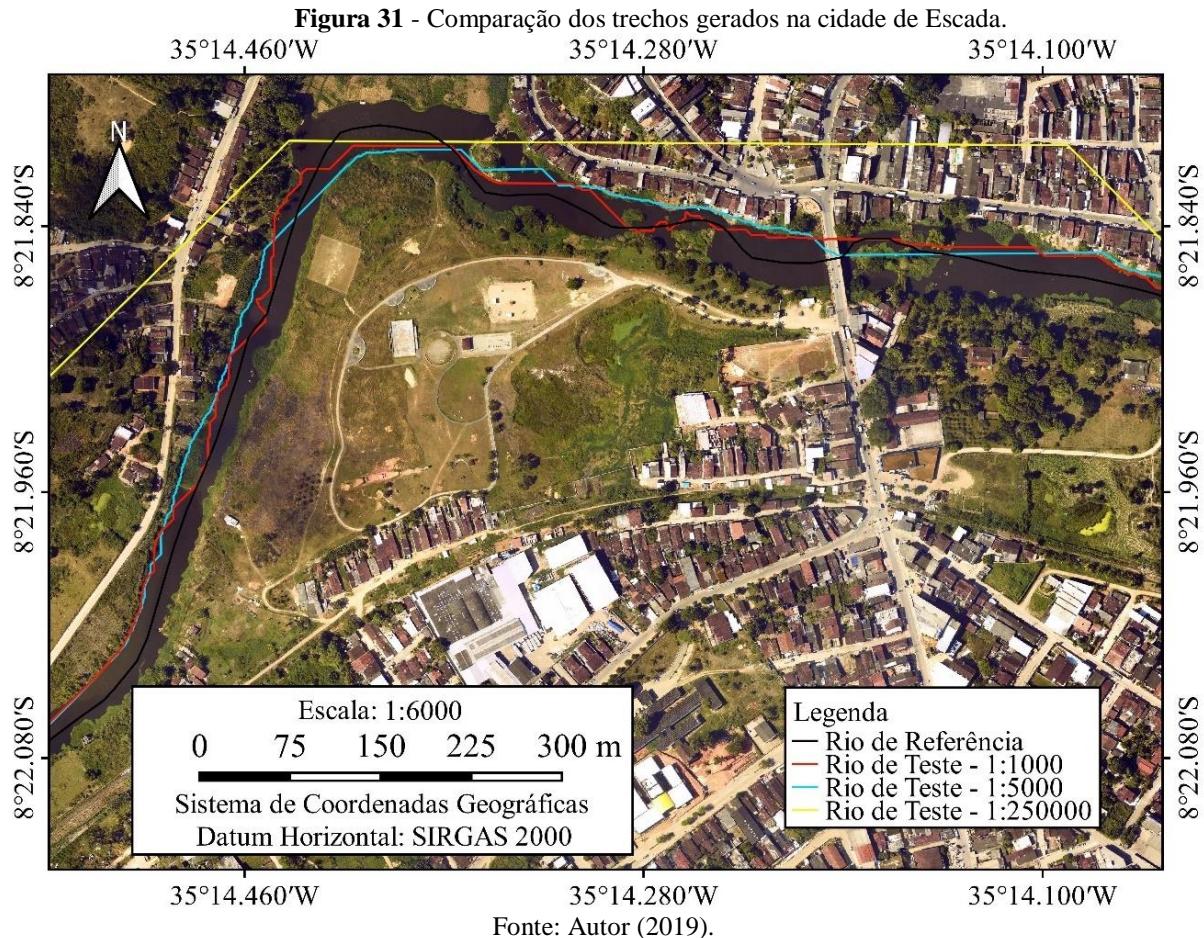
5.6 Comparação entre os trechos do rio Ipojuca nas cidades.

Parte dos trechos utilizados para a comparação dos rios gerados nos modelos digitais 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000, nas cidades de São Caitano, Caruaru e Escada, são demonstrados nas Figuras 29, 30 e 31. Visualmente já se pode distinguir a discrepância posicional entre a posição real do rio e a gerada a partir dos MDTs do PE3D e do MDE do TOPODATA: enquanto os trechos gerados pelos MDTs em escala 1:1.000 e 1:5.000 não apresentam uma diferença visualmente tão perceptiva, a distorção do traçado é muito significativa no caso gerado a partir do TOPODATA.

Figura 29 - Comparação dos trechos gerados na cidade de São Caitano.
 36°8.505'W 36°8.370'W 36°8.235'W







5.6.1 Banda Épsilon

Como resultados da aplicação dos métodos de avaliação posicional para feições lineares tem-se inicialmente os resultados obtidos pelo método da Banda Épsilon, onde a comparação dos trechos de testes com o de referência resultou na Banda de Erro Épsilon apresentada na Tabela 5. Nas três cidades a menor Banda de Erro Épsilon, ou seja, a menor discrepância posicional se deu com o trecho de teste gerado pelo MDT 1:1.000 do PE3D. Porém considerado o erro planimétrico das ortoimagens (utilizadas na criação do trecho de referência) como sendo PEC-PCD classe A, 0,28 m de erro máximo, ou mesmo uma classe levemente menor, observa-se que a acurácia posicional dos rios gerados em 1:1.000 e 1:5.000 apresentam resultados equivalentes. Já o trecho gerado pelo MDE na escala 1:250.000 apresenta um erro planimétrico consideravelmente maior se comparado com os gerados nos outros dois modelos.

Tabela 5 - Banda de Erro Épsilon para as escalas 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000 para as três cidades.

Escala de dados utilizados para geração da rede	São Caetano (m)	Caruaru (m)	Escada (m)
1:1.000	6,467	5,217	7,600
1:5.000	6,538	6,340	10,916
1:250.000	43,332	69,596	71,574

Fonte: Autor (2019).

5.6.2 Distância de Hausdorff

Para Distância de Hausdorff foram obtidos os resultados apresentados na Tabelas 6, representando as comparações realizadas nas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada. Assim como o método da Banda Épsilon, a aplicação do método da Distância de Hausdorff apontou os resultados esperados com o trecho resultante do MDT em escala 1:1.000 do PE3D, apresentando menor distanciamento quanto a posição real do rio e a discrepância posicional muito maior quando comparado o MDE em escala 1:250.000.

Tabela 6 - Distância de Hausdorff para os trechos do rio Ipojuca obtidos nas cidades de São Caetano, Caruaru e Escada.

Escala de dados utilizados para geração da rede	d_1 (m)	d_2 (m)	Distância de Hausdorff (m)
São Caetano	1:1.000	7,44	7,44
	1:5.000	7,64	7,64
	1:250.000	43,98	53,16
Caruaru	1:1.000	6,28	6,28
	1:5.000	7,97	7,97
	1:250.000	67,19	75,25
Escada	1:1.000	8,51	8,51
	1:5.000	13,83	13,83
	1:250.000	73,50	85,92

Fonte: Autor (2019).

5.6.3 Influência do Vértice

O resultado da análise pelo Método da Influência do Vértice pode ser evidenciado na Tabela 7. Assim como nos dois últimos métodos, o rio gerado pelo MDT na escala 1:1.000 apresentou maior acurácia posicional nos trechos de Caruaru e Escada. Já na cidade de São Caetano o resultado da aplicação do método resultou em uma menor discrepância para o rio

gerado no MDT 1:5.000, porém, a diferença foi de menos de 5,0 cm, não divergindo do esperado, devido também à boa representatividade do MDT em 1:5.000.

Tabela 7 - Discrepância posicional dada pelo método da Influência do Vértice.

Escala de dados utilizados para geração da rede	São Caetano (m)	Caruaru (m)	Escada (m)
1:1000	6,568	5,264	7,929
1:5000	6,524	6,844	11,393
1:250000	47,260	74,221	73,638

Fonte: Autor (2019).

6. CONCLUSÃO

A obtenção da rede hídrica de uma bacia por MDTs de alta resolução espacial é um procedimento que traz significativo aumento de precisão no processo de traçado das redes de rios. Isso foi evidenciado no estudo pela geração da rede de drenagem na bacia do Ipojuca pelos MDTs em escala 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000, a partir das bases de dados PE3D e TOPODATA. No entanto, o ganho de qualidade se reflete em significativo aumento do esforço computacional.

Quanto à comparação do traçado do rio gerado nas três cidades, os trechos gerados a partir dos MDTs 1:5.000 e 1:1.000 do PE3D apresentaram erro planimétrico próximo um do outro, sendo o de 1:1.000 o mais preciso. Já os segmentos obtidos pelos MDEs do TOPODATA apresentaram uma divergência considerável, sendo o erro muito maior quando comparado aos MDTs do PE3D. A comparação dos trechos do rio Ipojuca obtidos a partir dos três modelos nas escalas 1:250.000, 1:5.000 e 1:1.000, comprovou que, em todas áreas de estudo, a acurácia planimétrica apurada pelos métodos da Banda Épsilon, Distância de Hausdorff e Influência do Vértice demonstra que o efeito da resolução do modelo digital afeta consideravelmente o resultado na posição do rio quanto ao traçado real. Tais erros se refletem nos usos que se façam da geração de rios, como em modelagem do escoamento e previsão de áreas alagáveis.

O uso dos MDEs provenientes do levantamento do SRTM na geração da rede hídrica de uma de extensa área apresenta resultados satisfatórios, porém para análises locais em áreas menores como áreas alagáveis por cheias, o uso de parâmetros provenientes dos MDTs de alta resolução se torna mais eficiente, apresentando menores distorções. Já a escolha entre o uso dos MDTs 1:1.000 ao MDTs em escala 1:5.000 não seria de compensado pelo esforço computacional visto que esses apresentaram discrepância planimétrica na rede gerada próximos um do outro. A utilização dos MDTs 1:5.000 já apresentaria resultados bastante eficazes.

Trabalhos futuros podem contribuir para uma melhor acurácia planimétrica das redes geradas, como a coleta de pontos de verificação em campo por GPS RTK, que apresentam erros milimétricos, obtendo-se trechos de referência para os rios com maior precisão.

REFERÊNCIAS

- APAC. Bacias Hidrográficas:** Rio Ipojuca. Disponível em:
http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=17. Acesso em: mai. 2019.
- ARIZA-VILLAVERDE, A. B.; JIMÉNEZ-HORNERO, F. J.; RAVÉ AGÜERA, E. G. DE.** Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. **Geomorphology**. v. 241, p. 243–254, 2015.
- BANCO MUNDIAL. Avaliação de perdas e danos:** Inundações Bruscas em Pernambuco - Junho de 2010. Brasília: Banco Mundial, 2012. 71p.
- BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D.** An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Computers and Geosciences**. v. 62, p. 128-135, 2014.
- BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; COSTA JÚNIOR, N. A.** Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005 Goiânia. **Anais** [...] Goiânia: INPE, 2005. p. 3997-4004.
- BASTOS, B. C.; ERCOLIN FILHO, L.** Utilização da tecnologia em projetos de engenharia de infraestrutura viária. In: Congresso Nacional y VIII Latinoamericano de Agrimensura, 11., 2012, Córdoba. **Proceedings** [...] Córdoba: CA, 2012.
- BOSQUILIA, R. W. D.; FIORIO, P. R.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R.** Comparação entre métodos de mapeamento automático de rede de drenagem utilizando SIG. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais** [...] Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 5872-5879.
- BRASIL. Decreto-lei n° 89.817 de 20 de junho de 1984.** Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasília, DF: Presidência da República, 1984. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm. Acessado em: 05 abr. 2019.
- BRASIL. Ministério da Defesa.** Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de Defesa da Força Terrestre. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2015. 385p.
- CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.** Introdução a ciência da geoinformação. INPE, São José dos Campos, 2001.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. DE.** Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998.
- CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J.** Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. 1998. Disponível em
<http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/analise.pdf>. Acessado em 2007.

CARVALHO, J. A. B. DE; SILVA, D. C. DA; Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 2, p. 725-744, 2018.

CIRILO, J. A. PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, XII. Lisboa, **Anais** [...] Portugal: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2015. v. 1. p. 81100. 2015.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C. DA; CAMPOS, J. H. A. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.

ESRI. ArcGIS desktop. Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/store/arcgis-desktop>>. Acesso em: mai. 2019.

ESRI. Na overview of the Hydrology toolset. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>>. Acesso em: abr. 2019.

FONSECA, I. G. R. DA. Avaliação da acurácia posicional tridimensional utilizando feições lineares. 2018. 84p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

FRANCO, T. P. L. Uso do sistema LiDAR na geração de MDT e avaliação segundo Padrões de exatidão cartográfica. Monografia (Especialização em Geoprocessamento). UFV. 2006.

FURNANS, J. E. Topologic Navigation and the Pfafstetter System. 2001. 225p. Tese (Mestrado em Engenharia) – The University of Texas as Austin, Texas, 2001.

GALO, M.; DAL POZ, A. P.; FERREIRA, F. M. O Uso de Feições no Controle de Qualidade em Cartografia. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 19, 2001, Porto Alegre. **Anais** [...] Porto Alegre: SBC, 2001. p. 7-12.

GONG, J.; XIE, J. Extraction of drainage networks from large terrain datasets using high throughput computing. **Computers and Geosciences**. v. 35, n. 2, p. 337-346, 2009.

HAYAKAWA, Y. S.; OGUCHI, T.; LIN, Z. Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3. **Geophysical Research Letters**, v. 35, p. 1-5, 2008.

HUTTENLOCHER, D. P.; KEDEM, K.; Computing the Minimum Hausdorff Distance. 1990.

IBGE. Cidades e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>>. Acesso em: abr. 2019.

INPE. TOPODATA. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: mai. 2019.

JET PROPULSION LABORATORY. U.S Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: mai. 2019.

JOHNSON, L. E. Geographic Information Systems. In: **Water Resources Engineering**, CRC Press, p. 340, 2009.

LA VEGA, P. G. DE; ARIZA-LÓPEZ, F. J.; MOZAS-CALVACHE, A. T. **Models for positional accuracy assessment of linear features**: 2D and 3D cases. Taylor & Francis: Survey Review, University Of Jaen, 2016.

LEAL, R. E.; MEDEIROS, L. T. B. DE; QUEIROZ, J. D. S.; BRITO, G. L.; COIADO, L. L. Utilização das extensões TauDEM e ArcHydros: Um estudo comparativo aplicado à delimitação automática de bacias hidrográficas no Estado do Pará. In: Seminário Estadual de Águas e Florestas, 5., 2017, Belém. **Anais** [...] Belém: Governo do Estado do Pará, 2017. p. 204-218.

LIU, X.; PETERSON, J.; ZHANG, Z. **High-Resolution DEM Generated from LiDAR Data for Water Resource Management**. Centre GIS, School of Geography and Environment Science Monash University. 2005.

MACIEL, O. A. Aplicações: Mapeamento Móvel utilizado tecnologia LIDAR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, Curitiba. **Anais** [...] Curitiba: INPE, 2011. p. 5455-5462.

MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro: GIS for Water Resources** Redlands. California: ESRI Press, 2002.

MALATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. Modelos digitais de elevação na delimitação automática das bus-bacias do rio Taquari-Antas no Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. João Pessoa, XVII, **Anais** [...] João Pessoa: INPE, 2015. p. 360-367. 2015.

MANTELLI, L. R.; BARBOSA, J. M.; BITENCOURT, M. D. Assessing ecological risk through automated drainage extraction and watershed delineation. **Ecological Informatics**. v. 6, p. 325-331, 2011.

MARQUES, H. G. PENATTI, N. C.; FILHO PARANHOS, A. C.; FROEHLICH, O.; ALMEIDA, T. I. R. DE; SHIMABUKURO, Y. Comparação entre os modelos de elevação SRTM, TOPODATA e ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba, XV, **Anais** [...] Curitiba: INPE, 2011. p. 1271-1278. 2011.

MENDES, A. T. Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio pela ferramenta de delimitação automática TauDEM. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 11, n.3, p. 973-986, 2018.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos**: Princípios, integração e aplicação. 2. Ed. Porto Alegre: ABRH, 2013.

MOZAS – CALVACHE, A. T. **Control de La Calidad Posicional Em Cartografia Por Elementos Lineales.** Jaén: Universidad de Jaén, Spain, 2007.

MOZAS-CALVACHE, A. T.; ARIZA-LÓPEZ, F. J. New method for positional quality control in cartography based on lines. A comparative study of methodologies. **International Journal of Geographical Information Science.**, vol. 25, n. 10, p. 1681-1695, 2011.

MURPHY, P. N. C.; OGILVIE, J.; MENG, F. R.; ARP, P. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. **Hydrological Processes.** v. 22, n. 12, p. 1747-1754, 2008.

OSGEO. **Qgis.** Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/>. Acesso em: abr. 2019.

PERNAMBUCO. **Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.** Recife: CONDEPE/FIDEM, 2005.

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional (PE3D).** Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: abr. 2019.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, New York, v.57, n.4. p. 241-262, 2003.

SANTOS, A. P. DOS. **Controle de qualidade cartográfica:** Metodologias para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SANTOS, J. B. DOS. **Distância entre curvas algébricas:** Uma discussão para o ensino médio. Tese (Mestrado em Matemática) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2000. p. 35-51.

SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M.; Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola.** v. 30, p. 46-57, 2010.

SOUZA FILHO, C. R. O Relevo das Américas como nunca antes visto. **InfoGeo**, n. 30, p.54-58, 2003.

STRASSBERG, G.; MAIDMENT, D. R. **ARC Hydro Groundwater data model.** Texas: University of Texas at Austin, 2004.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, Utah, v. 33, n. 2, 1997. p. 309-319.

TOLENTINO, F. M.; DA SILVA, C. R.; SANTIL, F. L. DE P. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ArcGIS e Qgis. **Revista Brasileira de Cartografia.** v. 69, n.7, p. 1287-1301, 2017.

TONG, X.; SUN, T.; FANA, J.; GOODCHILD, M. F.; SHI, W. A statistical simulation model for positional error of line features. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.**, v. 21, p. 136-148, 2013.

TRIBE, A. **Automated recognition of Valley Heads from Digital Elevation Models**. Earth Surface Processes and Landforms. 1992.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008.

VAZE, J.; TENG, J.; SPENCER, G. Impacto of DEM accuracy and resolution on topographic indices. **Environmental Modelling & Software**. v. 25, p. 1086-1098, 2010.

ZANETTI, J.; PAULA, R. M. DE; SANTOS, A. P. DOS; MEDEIROS, N. G. Avaliação da acurácia posicional planimétrica de ortoimagens disponibilizadas nos sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**., v. 68, n. 2, p. 1341-1352, 2016.