

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA

Nathalia Rose Silva da Purificação
Renata Miranda da Silva

**ESTUDO DE MICRO E NANOBACIAS HIDROGRÁFICAS PARA SUBSIDIAR A
IMPLANTAÇÃO DO CONCEITO BASE ZERO EM ÁREAS RURAIS DO
SEMIÁRIDO NORDESTINO.**

RECIFE
2017

Nathalia Rose Silva da Purificação
Renata Miranda da Silva

**ESTUDO DE MICRO E NANOBACIAS HIDROGRÁFICAS PARA SUBSIDIAR A
IMPLANTAÇÃO DO CONCEITO BASE ZERO EM ÁREAS RURAIS DO
SEMIÁRIDO NORDESTINO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva

RECIFE
2017

P985e Purificação, Nathalia Rose Silva da

Estudo de micro e nanobacias hidrográficas para subsidiar a implantação do conceito base zero em áreas rurais do semiárido nordestino. /Nathalia Rose Silva da Purificação, Renata Miranda da Silva. – Recife: O Autor, 2017.

73 folhas, il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva

TCC (graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Delimitação. 3. Bacias hidrográficas. 4. Conceito base zero. 5. PE3D. I. Silva, Renata Miranda da. II. Silva, Daniel Carneiro da (orientador). III. Título.

526.1 CDD (22. ed.)

UFPE

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr. Daniel Carneiro da Silva
Universidade Federal de Pernambuco (Orientador)

Prof. Lígia Albuquerque de Alcântara
Universidade Federal de Pernambuco (Co-orientadora)

Prof. Dr. José Luiz Portugal
Universidade Federal de Pernambuco

Aos nossos pais, Gilvan e Rosânia, Ivanildo e Tânia,
nossas bases e maiores tesouros.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, fundamento de tudo em minha vida, por renovar a cada momento as minhas forças e guiar meus passos.

Aos meus pais, Gilvan e Rosânia, meus maiores incentivadores, minha eterna gratidão por todo apoio e por me ensinarem desde cedo a importância da educação, acreditando e torcendo sempre pelos meus objetivos. Serei eternamente grata por estarem sempre ao meu lado, confiando e apostando na minha capacidade. Amo vocês mais que tudo.

Ao meu noivo e futuro esposo, Renan. Por todo amor, paciência, carinho e motivação nesses longos anos de convivência. Por ser meu melhor amigo e porto seguro. Obrigada pela compreensão, por me fazer feliz e ficar igualmente feliz com minhas conquistas. Por ouvir minhas angústias e por me conhecer tão bem. Amo você.

Às minhas primas e irmãs de coração: Rayanne, Talita, Yully, Mayara, Ericlécia e Ana Íris. Por serem minhas primeiras amigas, por permanecerem sempre ao meu lado e por terem me proporcionado grandes sorrisos. Amo vocês.

Aos meus avós maternos, Dona Ozana e Manoel, pelo carinho, dedicação e sacrifícios. Vocês são o alicerce da família Silva. Amo vocês.

Aos meus avós paternos, Dona Maria e Geraldo (*in memoriam*). Por conseguirem manter a Família Purificação sempre unida e vibrarem sempre por nossas conquistas. Amo vocês.

À minha sogra e mãe, Dona Nalva. Por me considerar como filha, torcer sempre por mim e não medir esforços para me ajudar em qualquer circunstância. Amo você.

Às grandes amigas que a vida me deu: Emylle, Bruna, Luzia, Camila, Luciana e Raquel, que compartilharam e compartilham grande parte dos meus momentos. Vocês são as melhores amigas que podem existir! Amo muito todas.

À Renata, minha amiga e companheira nesse trabalho e em tantos outros na vida acadêmica. Por estar sempre presente, por compartilhar das minhas inquietações e por ser a melhor conselheira. Sei que posso contar com você em qualquer momento. Amo você, Rê.

À Pricila, a pessoa mais altruísta que já conheci na vida. Obrigada por me ajudar e por me fazer perceber a importância da gentileza. Te amo, Priu.

À todos os meus familiares que sempre torceram e oraram por mim. Por desejarem que eu seja o melhor que eu possa ser. Vocês são a minha base.

À professora e orientadora de Iniciação Científica, Andrea Tenório, por toda dedicação, compreensão e incentivo nesta jornada acadêmica. Obrigada por ser minha mentora e por despertar em mim a aptidão para a área de pesquisa.

Ao orientador Daniel Carneiro, pela confiança e por ter sido responsável pela minha participação no Projeto Conceito Base Zero.

Ao Engenheiro e idealizador do Projeto Conceito Base Zero, José Artur Padilha, por todo ensinamento e por todo conhecimento compartilhado. É uma honra imensa fazer parte de um projeto tão motivador!

À Fundação Terra, por fornecer os recursos necessários para o desenvolvimento do projeto durante o primeiro ano de sua execução.

À Judite, que se tornou uma pessoa muito querida no Departamento de Engenharia Cartográfica. Minha gratidão pelo apoio nos momentos de perrengue e por toda proteção que me deu.

À todos os meus professores da graduação que me fizeram amar a Engenharia Cartográfica e me sentir realizada com a área que escolhi profissionalmente.

À minha banca, pela disponibilidade em aceitar a avaliação deste trabalho.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho ou que se fizeram presentes na minha vida acadêmica e pessoal.

Nathalia Rose Silva da Purificação

AGRADECIMENTOS

A Deus, o centro da minha vida, ao qual sou inteiramente dependente, por todo sustento e renovação a cada tribulação enfrentada. Por todas as bênçãos que Ele me concede a cada dia e pelo discernimento ao longo dessa jornada. Sem Ele, nada seria.

Aos meus pais, Tânia e Ivanildo, meus maiores exemplos. Vocês são minha vida. Tudo o que fiz, faço e farei é por vocês e para vocês. Obrigada por cada incentivo e orientação, pelos esforços realizados para me dar aquilo que vocês não tiveram e por estarem sempre ao meu lado, me dando força, me apoiando, me aplaudindo de pé na primeira fila em todas as circunstâncias, e principalmente acreditando em mim. Amo muito vocês.

À Rafaela, minha irmã, por ser minha amiga e companheira a vida inteira, por sempre se orgulhar de mim, por apoiar minhas decisões, permanecendo sempre presente na partilha de minhas conquistas e frustrações. Você é meu espelho. Tudo o que sou hoje devo a você, que me orienta a seguir pelos melhores caminhos. Amo você, minha irmã.

Aos meus avós, Zuleide e Aluizio, que sempre estiveram orando por mim e de braços abertos pra me acolher sempre que precisei. Vocês são os amores da minha vida. Amo muito vocês!!!

A Guto, meu futuro esposo, meu amigo e companheiro, que esteve presente em todos esses anos de luta, esforço e dedicação, e se mostrou sempre paciente e compreensivo. Obrigada por todo amor, cuidado, apoio e por ouvir minhas inquietações e ansiedades. Obrigada por fazer parte da minha vida. Amo você.

A todos os meus familiares e amigos, por todas as orações e todos os momentos de alegria compartilhados, pelo apoio, força e por vibrarem com cada conquista minha.

À minha prima e irmã, Chavelle. Estivemos, estamos e estaremos sempre juntas. Obrigada por se fazer presente em todos os momentos da minha vida e por todos os momentos compartilhados. Amo você Cha!

Ao meu sobrinho Conrado, que transborda amor puro e verdadeiro. Com os sorrisos mais inocentes e sinceros que já vi e que me fazem esquecer todos os problemas. Eu amo você, meu pequeno.

À Nathalia, minha companheira de realização deste trabalho e de tantas lutas. Estivemos juntas nesses cinco anos de graduação, na Iniciação Científica, e agora, no Trabalho de Conclusão de Curso, fomos apoio uma para outra e nossa parceria vai além da faculdade.

À Pricila, que junto à Nathalia, nos tornamos inseparáveis durante os cinco anos de graduação. Juntas em todos os momentos nos fizemos fortes e guerreiras para transpor as dificuldades. Foram muitos momentos compartilhados e muitas noites sem dormir. Continuaremos firmes e fortes, sempre.

Às minhas amigas e companheiras na graduação, não menos importantes, presentes que Universidade me deu, Aline da Mata, Camila Ribeiro, Maria Luciana e Raquel Arcoverde, por estarem presentes nessa caminhada e nesse momento tão importante da vida acadêmica, partilhando conhecimentos, alegrias, angústias e ansiedades. Amo vocês!

Às minhas irmãs que escolhi pra vida, Claudiane e Giovana, que estão sempre orando e torcendo por mim e vibrando comigo à cada conquista! Obrigada por tudo meus amores! Amo vocês!

Ao meu orientador Daniel Carneiro, por compartilhar conhecimentos e por ter sido responsável pela minha participação no projeto Conceito Base Zero. Agradeço por sua compreensão e pela sua confiança.

Ao Engenheiro e idealizador do Projeto Conceito Base Zero, José Artur Padilha, por tantos ensinamentos e por todo conhecimento compartilhado.

À Fundação Terra, por fornecer os recursos necessários para o desenvolvimento do projeto durante o primeiro ano de execução.

À professora Andrea Tenório, por todo o carinho e confiança durante os anos de Iniciação Científica. Te admiro como pessoa e como profissional, Andrea. Obrigada por todo conhecimento passado.

À professora Lígia Alcântara, por ser tão solícita ao ponto de se tornar uma pessoa tão querida. Obrigada pelo incentivo e por compartilhar tantos conhecimentos. À você, minha gratidão e admiração.

À minha banca, por ter aceitado avaliar e contribuir com este trabalho, Lúcia e Portugal.

Aos meus professores do Departamento de Engenharia Cartográfica, por compartilharem seus conhecimentos, me fazendo amar ainda mais a profissão que escolhi para a vida. Cada um tem uma parcela de contribuição para minha vida profissional.

À Judite, uma mãe dentro da Universidade que Deus me presenteou. Sempre tão atenciosa e preocupada. Sem dúvida, tem um lugar reservado meu coração.

Por fim, agradeço a todos e todas que me apoiaram e contribuíram de formas diversas para a conclusão de mais um ciclo da vida!

Renata Miranda

RESUMO

A caracterização física da bacia hidrográfica e do sistema de drenagem constitui umas das etapas iniciais na maioria das análises hidrológicas, além de definir uma unidade territorial que é cada vez mais importante na gestão dos Recursos Hídricos. O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo direcionado à utilização de métodos para obtenção de micro e nanobacias hidrográficas extraídos de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Superfície (MDS) em diferentes Sistemas de Informações Geográfica (SIG) utilizando técnicas de Geoprocessamento, de modo a constatar a influência de resoluções espaciais distintas através das ferramentas disponíveis nos *softwares* para executar análises hidrológicas, eliminar erros provenientes da delimitação manual das bacias e gerar produtos com grande nível de detalhamento. A pesquisa foi aplicada em uma área de estudo que corresponde à confluência dos municípios de Arcoverde, Sertânia e Buíque, mais especificamente nos territórios de ação da Fundação Terra, visando implantar o Conceito Base Zero para sanar a falta do abastecimento de água e promover o uso sustentável do solo e de outros recursos na região. Com a divulgação do Programa Pernambuco Tridimensional pelo Governo do Estado, uma nova fonte de dados tornou-se disponível, sendo esta de resolução espacial superior às informações já disponibilizadas na *Web*. Tendo em vista que muitos trabalhos acadêmicos envolvendo processos automáticos e semiautomáticos de delimitação de bacias e microbacias hidrográficas têm sido realizados com o uso de dados da missão SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*, foi decidido produzir um estudo comparativo para estabelecer uma conexão entre os avanços geotecnológicos e o uso da informação geoespacial em um projeto que requer planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Delimitação. Bacias hidrográficas. Conceito base zero. PE3D.

ABSTRACT

The physical characterization of the hydrographic basin and the drainage system is one of the initial steps in most hydrological analyzes, in addition to defining a territorial unit that is increasingly important in the management of Water Resources. The present work has as main objective to carry out a study directed to the use of methods to obtain hydrographic microbubbles and nanobacias extracted from Digital Terrain Models (MDT) and Digital Surface Models (MDS) in different Geographic Information Systems (GIS) using techniques of Geoprocessing, in order to verify the influence of different spatial resolutions through the tools available in the software to perform hydrological analyzes, to eliminate errors coming from the manual delimitation of the basins and to generate products with great level of detail. The research was applied in a study area that corresponds to the confluence of the municipalities of Arcoverde, Sertânia and Buíque, more specifically in the Terra Foundation action territories, aiming at implanting the Zero Base Concept to remedy the lack of water supply and to promote the use sustainable development of soil and other resources in the region. With the release of the Pernambuco Tridimensional Program by the State Government, a new data source has become available, and this space resolution is superior to the information already available on the Web. Given that many academic papers involving automatic and semiautomatic delimitation processes basins and watersheds have been carried out using SRTM data - Shuttle Radar Topography Mission, it was decided to produce a comparative study to establish a connection between geotechnical advances and the use of geospatial information in a project that requires planning and management of water resources.

Keywords-key: Delimitation. Watershad. Zero Base Concept. PE3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Correções das depressões do modelo por meio da ferramenta <i>fill sinks</i>	27
Figura 2 – Esquemática do funcionamento dos barramentos de pedra	30
Figura 3 – Localização da área de confluência dos três municípios	32
Figura 4 – Área de Confluência inserida na Região Hidrográfica do São Francisco	33
Figura 5 – Base de dados coletadas em instituições distintas	36
Figura 6 – Etapas de Delimitação Automática de Bacias	37
Figura 7 – Delimitação das microbacias nas ferramentas ArcHydro e GRASS (limiar de 2000) e SAGA (sem limiar)	49
Figura 8 – Resultados dos processamentos adotando diferentes limiares para os modelos estudados	53
Figura 9 – Resultados da extração da rede de drenagem com os dados do PE 3D (limiar de 20.000) e da SRTM (limiar de 500)	55
Figura 10 – Escolha da Microbacia da Fundação Terra	57
Figura 11 – Resultado da Delimitação das Nanobacias e Escolha da Subunidade da Fundação Terra	58
Figura 12 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Microbacia da Fundação Terra	63
Figura 13 – Mapa Hipsométrico	65
Figura 14 – Histograma de Frequência do Mapa Hipsométrico	66
Figura 15 – Mapa de Declividade	67

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Etapas relativas à análise dos dados	35
Fluxograma 2 – Etapas seguidas no GRASS utilizando o <i>software</i> QGIS	38
Fluxograma 3 – Etapas seguidas no SAGA utilizando o <i>software</i> QGIS	39
Fluxograma 4 – Etapas seguidas no ArcHydro Tools utilizando a versão de avaliação no <i>software</i> ArcGIS	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Fisiográficas relevantes para a análise da estrutura e dinâmica das bacias hidrográficas a partir de Tonello et al. (2005)	28
Tabela 2 – Estatística dos dados utilizados	47
Tabela 3 – EMQ entre os dados	47
Tabela 4 – Valores EMQ de acordo com o PEC	48
Tabela 5 – Áreas das MBH esperadas utilizando o limiar de 2000 células	50
Tabela 6 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas pela ferramenta do ArcHydro	50
Tabela 7 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas pela ferramenta do GRASS	51
Tabela 8 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas pela ferramenta do SAGA	51
Tabela 9 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas com diferentes limiares no ArcHydro	53
Tabela 10 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas com diferentes limiares no GRASS	54
Tabela 11 – Área das Nanobacias Hidrográficas da Fundação Terra	59
Tabela 12 – Características fisiográficas da Microbacia Hidrográfica Fundação Terra	59
Tabela 13 – Características fisiográficas da Nanobacia Hidrográfica Fundação Terra	61

LISTA DE SIGLAS

CBZ	Conceito Base Zero
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco
DSG	Diretoria de Serviços Geográficos do Exército
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMQ	Erro Médio Quadrático
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GSD	Ground Sample Distance
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
ITEP	Instituto Tecnológico de Pernambuco
LIDAR	Light Detection and Ranging
MBH	Microbacia Hidrográfica
MDT	Modelo Digital do Terreno
NBH	Nanobacia Hidrográfica
MNT	Modelos Numéricos do Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SAGA/GIS	System for Automated Geoscientific Analyses

SAR	Synthetic Aperture Radar
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Recursos Hídricos
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission,
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TIN	Triangular Irregular Network
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	JUSTIFICATIVA	20
3	OBJETIVOS	21
3.1.	Objetivo Geral	21
3.2.	Objetivos Específicos	21
4	TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO NO ESTUDO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	21
4.1.	Sensoriamento Remoto	21
4.1.1.	Sistemas de Radar	22
4.1.2.	Técnicas de Fotogrametria	22
4.1.3.	Tecnologia Laser Scanner	23
4.2.	Geoprocessamento	24
4.2.1.	Ferramentas de Geoprocessamento para Hidrologia	24
4.2.2.	Processos de Correção dos Modelos Digitais de Elevação	26
5	A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE TERRITORIAL	27
6	CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	28
7	O MANEJO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	29
7.1.	Projeto: CBZ -Conceito Base Zero	29
8	ÁREA DE ESTUDO	31
9	METODOLOGIA DO TRABALHO	35
9.1.	Procedimentos Metodológicos	35
9.1.1.	Coleta de dados	36
9.1.2.	Análise Estatística dos Modelos	36
9.1.3	Correção de erros altimétricos nos dados	37
9.1.4	Delimitação Automática de Micro e Nanobacias Hidrográficas	37
9.1.5	Extração da Rede de Drenagem	41
9.1.6	Adoção de uma Micro e delimitação da Nanobacia Fundação Terra	41
9.1.7	Cálculo das Características Fisiográficas	41
9.1.8	Mapeamento do Uso do Solo	45
9.2.	Base da Dados Espaciais	45
10.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
10.1	Análise comparativa entre os modelos	46

	17
10.2 Delimitação Automática de Microbacias	48
10.3 Extração da Rede de Drenagem	54
10.4 Adoção de uma Microbacia e Delimitação das nanobacias para a Fundação Terra	55
10.5 Cálculo das Características Fisiográficas da Micro e Nanobacia adotadas	59
10.6 Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo	62
10.7 Produtos Cartográficos	64
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE	73

1 INTRODUÇÃO

A água é o insumo básico da sobrevivência de todas as espécies e indicador do desenvolvimento de uma região sendo necessária atenção especial no seu manejo visando sua conservação em qualidade e quantidade. Isso é alcançado por meio da gestão dos recursos hídricos que se refere aos procedimentos relativos a tentativa de equacionar e resolver as questões da água e otimizar o seu uso (ANEEL, p.60, 2001).

O Brasil é considerado um país privilegiado quanto ao volume de recursos hídricos, porém, a disponibilidade de água não é uniforme; deste modo a distribuição e a oferta de água tratada refletem contrastes no desenvolvimento e desigualdade sociais associadas. Segundo a síntese de indicadores da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD (2009), o número de domicílios atendidos por rede geral de abastecimento de água no Brasil (49,5 milhões) representou 84,4% do valor total. Foi observada uma tendência de crescimento ao longo dos anos anteriores, exceto na Região Nordeste, que apresentou um crescimento discreto na proporção de domicílios atendidos.

A região semiárida do Nordeste é caracterizada como o estigma da seca, apresentando chuvas irregulares e em pouca quantidade, acarretando a emigração em massa da população. Segundo PADILHA et al. (2004),

O regime de chuvas nesta região é caracterizado por períodos longos de estiagem com secas devastadoras que provocam a “hibernação” das plantas e a morte dos animais. A falta de água faz com que a população rural e das pequenas cidades fiquem submetidas a condições de extrema dificuldade. A capacidade de suporte da região é pequena e o desmatamento atualmente em acelerada progressão e já em enormes proporções a reduz ainda mais.

Em poucas épocas do ano, a precipitação apresenta-se em grande quantidade. Estes eventos causam ações devastadoras devido às águas derivadas das bacias hidrográficas, que por sua vez, não conseguem infiltrar o solo de forma satisfatória para o reabastecimento dos aquíferos. Dessa maneira, é comum a construção de açudes ou reservatórios temporários para que as águas se acumulem. Porém, segundo SUASSUNA (2002), estimam-se que cerca de 40% das águas dos reservatórios se perde com a evaporação e para DEMETRIO (1993) estas são, na maioria das vezes, de qualidade inferior, normalmente servindo apenas ao consumo animal, à irrigação e, ocasionalmente, ao consumo humano.

Diante da ineficiência das alternativas existentes até o momento para solucionar os problemas da seca, estudiosos passaram a discutir sobre a criação de mecanismos legais para a preservação e uso sustentável da água de bacias hidrográficas, e, de maneira abrangente, sobre a busca por uma solução capaz de beneficiar à população destas áreas nas épocas de estiagem.

A bacia hidrográfica é considerada como a unidade fisiográfica mais conveniente para o planejamento dos recursos hídricos, pelo fato de constituir-se em sistema aberto de fluxo hídrico à montante do ponto onde a vazão do curso principal é medida (ROCHA, 2008). Neste contexto, Granell-pérez (2004), afirma que a bacia hidrográfica ou bacia de drenagem é constituída pelo conjunto de superfícies que, através de canais e tributários, drenam água da chuva, sedimentos e substâncias dissolvidas para um canal principal. Dessa forma, o desempenho hidrológico das bacias é analisado e estudado de acordo com as características fisiográficas referentes ao seu meio, avaliado junto com os apontamentos fluviométricos.

Levando em conta que a atenuação da seca hidrológica depende da eficiência da gestão das águas, surgiu então, há mais de quatro décadas, o *Conceito Base Zero*, desenvolvido pelo Engenheiro Mecânico José Artur Padilha e adotado pela Agenda 21 na área de Agricultura Sustentável do Governo Federal com objetivo de resolver os problemas da escassez de água na região do Semiárido. O projeto preceitua que, para obter-se o aproveitamento máximo permanente da energia incidente numa dada área agrícola, é necessário ajustar as condições do terreno aos fluxos naturais da água e favorecer sua retenção sem que se provoque salinização, otimizando o uso adequado dos elementos do solo.

Neste contexto, afirma-se que o gerenciamento das bacias hidrográficas é um instrumento orientador de ações do poder público e da sociedade no controle do uso dos recursos ambientais pelo homem, sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável. O Conceito Base Zero visou a geração de uma economia sustentável nas microbacias hidrográficas do sertão, se enquadrando em uma ação de pequeno porte visando grandes resultados, através de equipamentos de baixo custo e que envolvem a mão de obra da própria comunidade. A implantação deste se deu na microbacia hidrográfica Carapuças (com área de 2176 ha), localizada na Fazenda Caroá no município de Afogados da Ingazeira - Pernambuco, como projeto piloto.

Durante as últimas décadas, foi grande a repercussão do Conceito Base Zero chamando a atenção dos poderes governamentais, da mídia, dos órgãos e instituições renomadas localizadas no Sertão Nordeste. Os interessados enxergaram ali a chance de acabar a escassez de água no semiárido com baixo custo. A ideia de armazenar a água de chuva sob a superfície, praticamente livre de salinização e da evaporação e que há mais de um século torna os mananciais fragilizados diante do clima seco, trouxe uma esperança para solucionar a falta de água para a população da região.

Diante da grande visibilidade do projeto piloto na Fazenda Caroá, uma das entidades interessadas à implantação do Conceito Base Zero foi a Fundação Terra. A mesma é um órgão

da sociedade civil, sem fins lucrativos, localizada na cidade de Arcoverde, nas cercanias dos municípios de Sertânia e Buíque, mais precisamente no sítio da Malhada, com aproximadamente 140ha de área. A Fundação Terra, fundada e coordenada pelo Padre Airton Freire, é responsável pelo auxílio a milhares de habitantes que usufruem dos benefícios concedidos pela instituição e possui projetos nas áreas social, cultural, da saúde, da educação, para crianças, jovens e adultos. A área sofre uma dramática situação social devido à seca, e esta foi a motivação para implantação do Conceito Base Zero nos territórios da Fundação.

Desta maneira, utilizando como área de estudo a confluência entre os municípios de Arcoverde, Buíque e Sertânia, o presente trabalho propõe um estudo, a partir da delimitação de micro e nanobacias hidrográficas utilizando técnicas e ferramentas de Geoprocessamento, para subsidiar a implantação do Conceito Base Zero nos territórios da Fundação Terra.

O estudo utilizará dados espaciais de fontes e resolução espacial diferentes, visando analisar o nível de detalhamento proporcionado por cada uma delas. Neste contexto, aliando os produtos obtidos por sensores remotos às ferramentas de geoprocessamento conectadas ao SIG, serão obtidos por consequência, um elevado ganho na qualidade dos produtos gerados.

2 JUSTIFICATIVA

Em Janeiro de 2017 as autoras iniciaram sua participação no projeto intitulado Implementação do Conceito Base Zero (CBZ) em parceria com a Fundação Terra, desenvolvendo atividades de Geoprocessamento para delimitação de micro e nanobacias hidrográficas na área de confluência dos municípios de Sertânia, Buíque e Arcoverde - Pernambuco. As micro e nanobacias foram determinadas como unidades de planejamento territorial para gestão dos recursos hídricos pelo engenheiro mecânico idealizador do projeto por serem consideradas áreas essenciais para manter as condições de produção sustentável (animal, vegetal e humana) com baixo custo na região do semiárido.

Inicialmente o processo de delimitação era realizado através da vetorização de cartas topográficas da SUDENE e da identificação dos divisores d'água por meio do traçado em torno da drenagem considerada e a partir dos pontos mais altos da região, observando a topografia local representada neste produto cartográfico. No entanto, este procedimento manual executado em ambiente SIG - Sistema de Informações Geográficas demandava um grande período de tempo e possuía um nível de detalhamento que não atendia às exigências do trabalho logo, se fez necessária à busca por novas metodologias e outras fontes de dados que pudessem auxiliar no desenvolvimento deste projeto.

Com a divulgação do Programa Pernambuco Tridimensional pelo Governo do Estado uma nova fonte de dados tornou-se disponível, sendo esta de resolução espacial superior às informações já disponibilizadas na *Web*. Tendo em vista que muitos trabalhos acadêmicos envolvendo processos automáticos e semiautomáticos de delimitação de bacias e microbacias hidrográficas têm sido realizados com o uso de dados da missão denominada *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), foi decidido produzir um estudo comparativo com dados de origens e resoluções diferentes visando estabelecer uma conexão entre os avanços geotecnológicos e o uso da informação geoespacial em um projeto que requer planejamento e gestão dos recursos hídricos.

3 OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Realizar um estudo de micro e nanobacias hidrográficas, analisando e interpretando suas características utilizando diferentes técnicas de Geoprocessamento.

3.2. Objetivos Específicos

- Comparar os Modelos Digitais de Elevação de diferentes fontes - SRTM, PE 3D e o obtido a partir das curvas de nível vetorizadas - a fim de verificar a interferência da resolução espacial no processo de delimitação automática de bacias.
- Efetuar processos de delimitação automática de bacias hidrográficas através de ferramentas disponíveis em ambientes SIG;
- Analisar as características fisiográficas das bacias;
- Mapear o uso e ocupação do solo na área de estudo escolhida;
- Gerar produtos cartográficos que auxiliem na implementação do conceito Base Zero.

4 TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO NO ESTUDO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

4.1. Sensoriamento Remoto

Segundo Liu (2015), o Sensoriamento Remoto é definido como uma técnica de aquisições e aplicações das informações sobre algum objeto sem que se tenha nenhum contato físico com ele através dos chamados sensores remotos. Estes podem ser acoplados tanto em aeronaves quanto a bordo de satélites e operar em diferentes faixas do espectro eletromagnético, o que diferencia o produto obtido: um sensor a bordo de um satélite opera nas regiões do visível ao termal e gera um produto denominado de imagem, enquanto que uma câmera acoplada a uma aeronave opera nas regiões do visível ao infravermelho próximo, gerando fotografias aéreas.

4.1.1. Sistemas de Radar

Os sistemas radar operam na faixa de micro-ondas e seus sensores possuem a grande vantagem de poderem adquirir dados independentemente da iluminação solar e de serem pouco influenciados pelas condições atmosféricas (DUTRA et al., 2003). Esta característica é de grande relevância para as áreas que sofrem com a alta probabilidade de incidência de nuvens.

Conforme Penha e Silva (2012), a missão SRTM, projeto internacional liderado pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), utilizou esta tecnologia no ano de 2000, quando um ônibus espacial levou em seu compartimento um sensor imageador ativo denominado radar de abertura sintética (SAR) com auxílio da técnica de interferometria (InSAR) operando nas bandas X ($\lambda = 3,1$ cm) e C ($\lambda = 5,6$ cm). Segundo Dutra et al. (2003), a InSAR utiliza um par de imagens no formato complexo para gerar uma terceira imagem complexa, dita imagem interferométrica, cuja fase de cada pixel é formada pela diferença de fase dos pixels homólogos nas duas imagens originais. Esta diferença de fase é o que permite determinar a altura da superfície e gerar Modelos Numéricos do Terreno (MNT).

Para Correa et al. (2017), o modelo gerado pela SRTM é um Modelo Digital de Superfície (MDS), pois os valores de elevação do mesmo só correspondem ao terreno em áreas abertas. Ou seja, em áreas de vegetação, as ondas de radar que operam nas bandas X e C não penetram no dossel das árvores, sendo então a elevação da SRTM correspondente a de uma superfície que passa perto do dossel.

4.1.2. Técnicas de Fotogrametria

A Fotogrametria é a ciência, técnica e a arte de extrair informações de distância e dimensões reais dos objetos através de fotografias métricas. Nas décadas de 70 e 80, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), fizeram uso da Fotogrametria para realizar o Mapeamento Sistemático Nacional que tem por objetivo elaborar cartas topográficas em escalas pequenas e médias, variando de 1: 1.000.000 até 1:25.000. Para isso, executou-se a cobertura aerofotográfica de parte do território nacional e aplicaram-se as etapas convencionais da técnica fotogramétrica para representar sobre um plano os acidentes naturais e artificiais da superfície terrestre de forma mensurável.

4.1.3. Tecnologia Laser Scanner

O processo de perfilamento ou varredura a laser é conhecido mundialmente como *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e consiste na utilização de um pulso de laser na direção do terreno para obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície (BALTSAVIAS, 1999). Este levantamento coleta uma grande quantidade de pontos, chamada nuvem de pontos, que possui informações tridimensionais de todos os alvos escaneados. Estes dados são classificados e filtrados para que seja gerado o Modelo Digital do Terreno.

Segundo Lima et al. (2017), o perfilamento a laser pode ser considerado como um método de medição e digitalização remota que possui elevada precisão e nível de detalhes nos levantamentos, cujos erros são muito menores dos que os obtidos com técnicas tradicionais. Ainda conforme Lima et al. (2017), esta tecnologia cresceu bastante com os avanços tecnológicos o que permitiu que a coleta de informações fosse mais rápida e precisa, diminuindo o tempo dos serviços prestados.

Recentemente, a Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco (SRHE), após a ocorrência de episódios drásticos de enchentes na região da Mata Sul do Estado, executou um serviço de mapeamento das áreas afetadas e da calha dos principais rios das bacias hidrográficas atingidas através da técnica *LIDAR*, o que permitiu obter dados com informações altimétricas de qualidade para a elaboração de projetos de barragens de controle de cheias e sistemas de prevenção. O sucesso do levantamento fez com que o mesmo fosse estendido para todo o território estadual, dando, então, origem ao Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) que gerou como produtos cartográficos MDT, MDE e ortofotos nas escalas de 1:5.000 e 1:1.000 (para alguns municípios da Região Metropolitana do Recife). O programa representou uma iniciativa inovadora tendo em vista que o Governo do Estado

disponibilizou, até o momento, boa parte dos dados e materiais obtidos com o levantamento na página oficial do PE 3D na internet para *download* pelos usuários.

4.2. Geoprocessamento

Define-se geoprocessamento como a ciência do tratamento numérico de informação geográfica, ou como um conjunto de tecnologias destinadas à coleta e tratamento de informações espaciais (CHALIER; QUINTAL E JUNIOR, 2004, p. 29). Se tratando das suas ferramentas, estas são meios relativamente poderosos e influentes para representar e estudar as bacias hidrográficas e desta forma proporciona, através de uma relevante manipulação de arquivos de imagens e dados, a composição de um cenário estático das informações envolvidas.

Os SIG – Sistemas de Informações Geográficas ligados diretamente às técnicas de Geoprocessamento trouxeram a velocidade nos processamentos dos dados espaciais, sendo capaz de lidar com grandes bases de dados e amplas possibilidades de visualização. As geotecnologias permitem a observação e o monitoramento de grandes áreas de maneira sistemática, integrando diversas informações em uma base de dados (CASTRO; WATRIN, 2013).

Segundo Choi et al. (2005), avanços recentes em tecnologia da informação, incluindo hardware, software e internet, têm fornecido soluções para diferentes aspectos da modelagem hidrológica. Xu et al (2001) afirma que os SIG tiveram um forte impacto no desenvolvimento destes modelos. As ferramentas de geoprocessamento tornaram-se essenciais para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão espacial para o gerenciamento de bacias (TAYLER et al., 1999).

Vanacker et al. (2005) afirmam que os estudos em nível de bacia hidrográfica permitem uma visão sistêmica dos elementos naturais nela inseridos, que favorecem, principalmente, a conservação da qualidade da água.

Desta maneira, utilizou-se *softwares* de SIG para efetuar a análise hidrológica na área rural do semiárido nordestino, tendo em vista que o uso das ferramentas viabilizou a análise voltada para o auxílio na classificação das redes de drenagem, na criação das micro e nano bacias e na caracterização das mesmas nos seus aspectos fisiográficos.

4.2.1. Ferramentas de Geoprocessamento para Hidrologia

A utilização do Geoprocessamento na gestão de recursos hídricos está relacionada com a necessidade de trabalhar com muitos dados de uma área específica, a qual requer uma integração perfeita entre dados dos mais variados tipos (físicos, cartográficos, hidrológicos, econômicos etc.), além de uma série de manipulações entre dados e modelos, com vistas a atender às mais diversas análises.

O desenvolvimento e aprimoramento de SIG e algoritmos de processamento automático, em combinação com o aumento da capacidade computacional e da disponibilidade de dados obtidos, tem permitido preparar diversos planos de informação para estudos hidrológicos de grandes áreas a baixo custo e com incrível rapidez. (BUARQUE et al., 2009).

Existem diversos *softwares* de geoprocessamento disponíveis que permitem ao usuário o controle na própria computação. Para comparação proposta no trabalho, foram utilizadas plataformas que delimitavam automaticamente microbacias. Dessa forma, três *softwares* com extensões hidrológicas integradas foram explorados: GRASS e SAGA oferecidos no *QGIS* v.2.14 e o ArcHydro oferecidos na versão de avaliação no *ArcGIS* v.10.3.

- GRASS

O Geographic Resources Analysis Support System - GRASS é uma extensão livre e de código aberto utilizado no *software* QGIS. Pode combinar vários módulos ao mesmo tempo em uma única análise, permitindo a execução automatizada de processos. Além disso, pode ser combinado com outros pacotes de *software* para análises estatísticas e aplicações *Web GIS* (BRUNO, 2016).

Sua plataforma apresenta módulos para processamento e georreferenciamento de imagens multiespectrais, manipulação de dados em formato matricial e vetorial, com interfaces para bancos de dados. A funcionalidade do GRASS está distribuída em ferramentas de execução e as interfaces de análises hidrológicas são aplicadas ao gerenciamento de bacia, com suporte a diferentes tipos de análise e delimitação (GROHMANN, 2008).

- SAGA

O System for Automated Geoscientific Analyses - SAGA/GIS é uma plataforma de código aberto, utilizado no *software* QGIS. De modo geral, estabelece uma estrutura que suporta uma implementação fácil e efetiva de algoritmos ou métodos para análises de dados espaciais. A extensão desenvolve ferramentas estabelecidas para a análise digital do terreno através de uma plataforma SIG e, além disso, oferece mais de 600 algoritmos que são

implementados em bibliotecas carregáveis dinamicamente ou objetos compartilhados em vários campos do empreendimento geocientífico. (CONRAD, 2007).

O SAGA foi criado para conceber uma aplicação fácil e eficaz de algoritmos espaciais, por meio da oferta de um conjunto abrangente e crescente de métodos geocientíficos, dispostos em uma interface gráfica facilmente acessível, com muitas opções de visualização, executado nos sistemas operacionais Windows e Linux (SAGA GIS, 2015).

- ArcHydro

Conforme ESRI (2012), o ArcHydro é um conjunto de funcionalidades que opera como uma barra de ferramentas (toolbox) dentro do ArcGIS, para complementar a análise temporal e geoespacial de dados, sendo voltada para suportar aplicações em gestão de recursos hídricos e modelagem hidrológica.

Com o uso desta extensão consegue-se delinear e caracterizar as bacias hidrográficas em formatos raster e vetoriais, da mesma maneira, definir e analisar as redes de drenagem que cobrem a área, gerenciando dados de séries temporais e exportando estes dados para modelos numéricos.

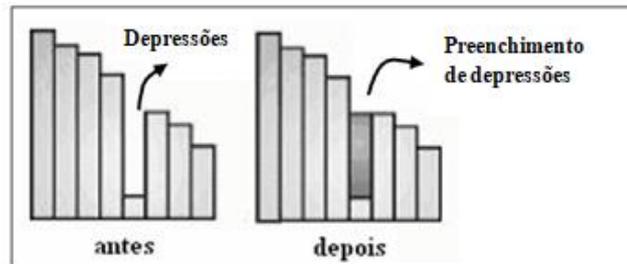
4.2.2. Processos de Correção dos Modelos Digitais de Elevação

Os modelos digitais de elevação e do terreno disponibilizados gratuitamente na *web*, geralmente podem apresentar eventuais erros altimétricos nos dados digitais, gerando picos e depressões (PENHA e SILVA, 2012). De acordo com Mendes e Cirilo (2001), estas depressões caracterizam-se por áreas rodeadas por elevações com valores de cotas superiores que não representam as feições reais encontradas no terreno. Desta forma, com o avanço da tecnologia, foram desenvolvidas algumas ferramentas em ambiente SIG que identificam as irregularidades e executam a sua correção.

Os processos de correção dos modelos digitais melhoram a qualidade geométrica das informações geoespaciais tendo em vista que a delimitação dos limites de bacias hidrográficas, a geração de curvas de nível, do fluxo de drenagem ou de linhas de drenagem são prejudicadas com o uso de modelos não corrigidos, gerando resultados ineficientes.

A maioria dos softwares de Geoprocessamento realiza esta tarefa através da ferramenta *Fill Sinks* (corrigir depressões) que considera as altitudes dos pixels vizinhos para preencher os vazios (SOBRINHO et al. 2010). A Figura 1 ilustra o processo de correção a partir deste comando.

Figura 1 – Correções das depressões do modelo por meio da ferramenta *fill sinks*.



Fonte: Sobrinho et al. (2010). Adaptado.

5 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE TERRITORIAL

Em 1997 foi publicada a Lei Nº 9.433, denominada de Lei das Águas. A mesma instituiu a PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tendo como fundamentos principais a definição da água como um bem público, o seu gerenciamento de forma a proporcionar usos múltiplos (abastecimento, agricultura, energia, indústria etc) e a determinação da bacia hidrográfica como unidade territorial para a implantação da PNRH.

Diversos autores têm destacado a importância do uso da bacia hidrográfica como unidade de gestão territorial. Lima et al. (2016) destaca que este princípio garante uma visão sistêmica, que tem como benefício a integração entre diferentes sistemas de planejamento e gerenciamento. Já Albuquerque (2012), insere parâmetros importantes neste contexto e afirma que através dele é possível realizar a delimitação da área e o reconhecimento físico da bacia, reconhecer o uso múltiplo dos recursos hídricos e seus critérios legais, permitindo a aplicação de legislações específicas.

De fato, as vantagens são enormes, pois especificando a área de atuação das políticas inerentes à administração dos recursos hídricos, problemas que tinham um nível global passam a ser encarados em escala regional, facilitando a gestão territorial. No entanto, é importante considerar que a divisão de bacias hidrográficas não observa aspectos sociais, políticos e fundiários. Deste modo, alguns obstáculos podem surgir na adoção desta metodologia. Contudo, é preciso criar soluções de parceria, transformando relações sociais e culturais para que os benefícios trazidos pelo uso da bacia hidrográfica como unidade territorial sejam percebidos não apenas do ponto de vista administrativo e da gestão hídrica, mas também do socioambiental, visando atender a demanda da população.

6 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Se tratando da caracterização das bacias hidrográficas, Tonello et al., (2005) explicam que as características físicas constituem um importante papel nos processos do ciclo hidrológico, tendo em vista que estas influenciam na infiltração, na quantidade de água e no percurso percorrido, na evapotranspiração, além dos escoamentos superficial e subsuperficial. Christofolletti (1980) afirma que a análise dos aspectos relacionados à drenagem, relevo e geologia pode levar à explicação e compreensão de diversas questões associadas à dinâmica ambiental local. De modo geral, as características fisiográficas de bacias são todas aquelas que podem ser extraídas de mapas, fotografias aéreas, imagens de satélite ou levantamentos topográficos. Algumas destas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Fisiográficas relevantes para a análise da estrutura e dinâmica das bacias hidrográficas a partir de Tonello et al. (2005).

Tipos de análises	Geométricas	Rede de Drenagem	Relevo
Características	Área total	Comprimento do curso de água principal	Orientação
	Perímetro total	Comprimento total dos cursos de água	Declividade máxima, média e mínima
	Coefficiente de compacidade (Kc)	Densidade de drenagem	Altitude máxima, média e mínima
	Fator de forma (F)	Ordem dos cursos de água	Declividade média do curso de água principal
	Índice de circularidade (Ic)	-	-
	Padrão de drenagem	-	-

Fonte: Carelli e Lopes (2011). Adaptado.

A área da bacia é considerada a área plana (projeção horizontal) inclusa entre os divisores topográficos. O coeficiente de compacidade e o fator de forma determinam o formato da bacia e influenciam no tempo transcorrido entre a ocorrência da precipitação e o escoamento no exutório (ponto de saída da bacia), sendo possível determinar, através destes, a tendência para enchentes das bacias.

O sistema de drenagem é constituído pelo rio principal e seus tributários. O estudo das ramificações e do desenvolvimento do sistema é importante, pois indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica (CARELLI e LOPES, 2011). O número de ordem dos cursos d'água representa o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma

bacia, sendo a ordem do rio principal a extensão de ramificação da bacia. Já a densidade de drenagem, relaciona o comprimento total dos cursos d'água e a área da bacia.

O relevo tem grande influência sobre os fatores hidrometeorológicos (temperatura do ar, precipitação, umidade relativa etc) que são funções das altitudes das bacias. Enquanto que a declividade controla, em boa parte, a velocidade do escoamento superficial.

7 O MANEJO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

O manejo integrado em bacias hidrográficas vem sendo aplicado em diversos segmentos da sociedade como uma estratégia de desenvolvimento urbano e rural. Conforme Aparecido et al. (2016), os estudos sobre o uso e ocupação do solo em conjunto com as características desta unidade territorial são de extrema importância para o gerenciamento e relação sustentável dos recursos hídricos. Este conceito pode ser entendido como o uso de práticas programadas para promover uma cuidadosa mudança no uso da terra, da cobertura vegetal ou de qualquer outro recurso. A forma como as atividades humanas influenciam a longo prazo na disponibilização da água no meio ambiente e na degradação do solo ganharam atenção especial para evitar o declínio deste bem. Com a adoção de rotinas de manejo (como raleamento da cobertura vegetal, corte em faixas, rotação de culturas, construção de diques ou barramentos para aumentar a produção de água etc) visa-se planejar as atividades humanas nas bacias, garantindo a sua integridade e equilíbrio ambiental.

Ao longo dos anos, muitas metodologias foram desenvolvidas e aplicadas. Silva (1994) já afirmava que o manejo possuía uma grande variabilidade de possibilidades e também limitações muito particulares. Porém, a busca pela conciliação entre preservação e manutenção do crescimento econômico continua em pauta nos dias atuais visando assegurar a sustentabilidade no uso da água e descobrir novas técnicas de manejo que conservem o ecossistema local.

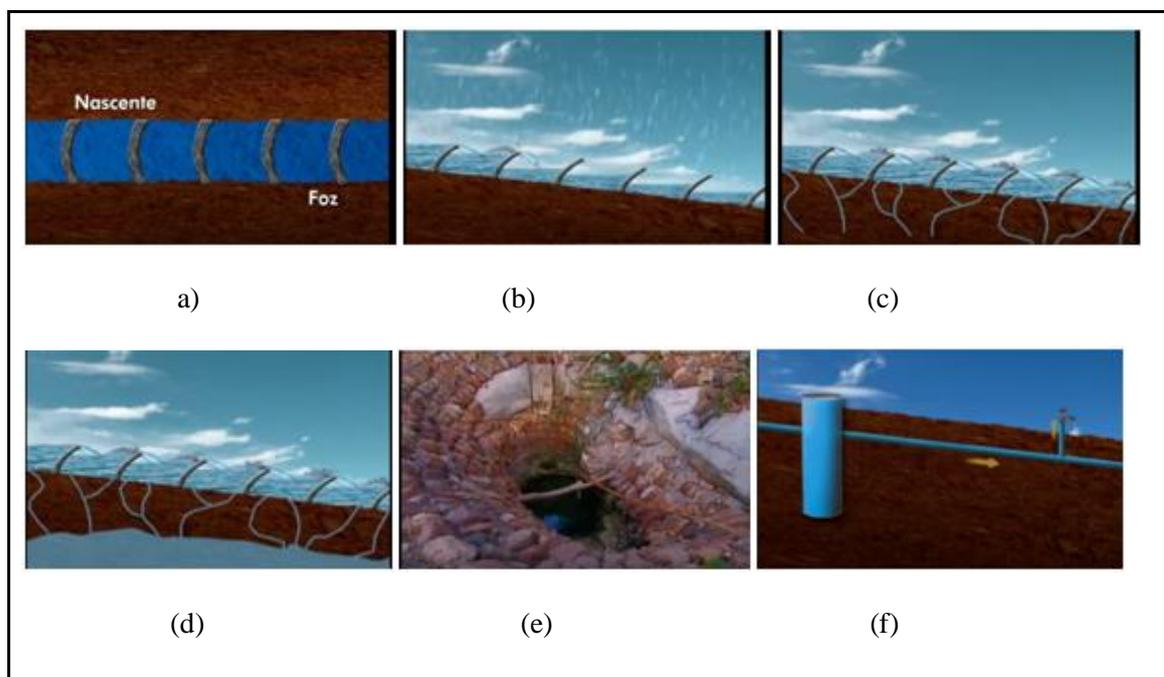
7.1. Projeto: CBZ -Conceito Base Zero

O Projeto Base Zero reverte à desertificação e inicia uma reconstrução ambiental que garante a recuperação do solo, o abastecimento d'água em regime de continuidade e a reintegração da flora e fauna nativas de regiões do semiárido do Nordeste Brasileiro considerando as premissas do manejo em bacias hidrográficas. Essa reconstrução ocorre a partir de observações do meio ambiente com respeito aos seus limites e considerando a microbacia como unidade de planejamento. Segundo Padilha, Zanghetin e Ortega (2004), a

ideia principal do CBZ consiste em fazer barramentos em formato de arco romano deitado e em forma de rampa nos cursos d'água, sejam eles temporários ou não, nas áreas da caatinga e do cerrado, construídos exclusivamente com pedras excedentes nas regiões rurais e mão de obra familiar. Estes barramentos viabilizam a acumulação de água no subsolo das unidades rurais e a construção de singelos sistemas gravitacionais de captação, condução, armazenamento e distribuição de água subterrânea rasa. Além disso, serve como ferramenta de contenção das partículas sólidas que poderiam gerar assoreamento nos cursos d'água.

A Figura 2 ilustra a disposição dos barramentos e a sua dinâmica nos leitos dos rios: (a) Os arcos são construídos a partir da justaposição das pedras, sem o auxílio de argamassa, de modo que sua convexidade esteja voltada para as nascentes e trabalhem, do ponto de vista estrutural, quase exclusivamente à compressão. (b) Na ocorrência de chuvas, os barramentos acoplados em série permitem que a água escoe mais lentamente e fique armazenada em platôs. (c) Ao reduzir a velocidade de escoamento, parte da água acumulada na superfície se infiltra no solo. (d) Através da percolação nos estratos geológicos, formam-se reservatórios subterrâneos rasos, livres da evaporação. (e) Nos pontos mais altos e próximos às nascentes, constroem-se as cacimbas, que, por gravidade (f), transportam água para todo o território da microbacia.

Figura 2 – Esquematização do funcionamento dos barramentos de pedra.



Fonte: *Print Screen* do vídeo Projeto BASE ZERO - Programa Globo Rural.

Para manter condições de produção sustentável, o CBZ sugere que apenas uma pequena área da bacia possa ser explorada para fins agrícolas, dando prioridade para culturas permanentes como as fruticulturas, sempre observando os limites da microbacia hidrográfica onde está inserida. Além disso, o tamanho da área agrícola é calculado em função da precipitação e evapotranspiração anual e sua localização deve ser a jusante da área preservada. O restante da microbacia deve ser explorado indiretamente, preservando a flora original, mediante um extrativismo em proporções racionais e um manejo adequado da pecuária, de forma a não degradar o ecossistema.

A partir das análises realizadas no projeto piloto (implantação do CBZ na Fazenda Caroá), seu idealizador observou os limites e exigências da ecologia local, considerando a precipitação média anual, o potencial médio de evapotranspiração e o escoamento superficial da região, ficando definido que as microbacias hidrográficas terão área média de aproximadamente 2000ha (dois mil hectares) e as nano bacias, área de 500ha (quinhentos hectares), tendo, cada microbacia, capacidade para hospedar até 50 famílias.

Diante do exposto, o presente trabalho realizou procedimentos de análise espacial considerando estas dimensões de micro e nano bacias hidrográficas, respeitando os limites da topografia local.

8 ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para realização deste trabalho compreende a região de confluência dos municípios de Sertânia, Arcoverde e Buíque (Figura 3), localizados no semiárido pernambucano, mais especificamente no território de atuação da Fundação Terra, tendo em vista que este será o espaço de implantação do Conceito Base Zero, almejando o abastecimento de água e o uso sustentável do solo nas zonas sociais e rurais do estado.

O território acima descrito pertence à Região Hidrográfica do São Francisco, que, segundo o SNIRH - Sistema Nacional de Recursos Hídricos, se estende por parte dos estados de Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal (Figura 4), compreendendo uma área de 638.576,00km² que corresponde a 7,5% do território nacional. Ainda segundo o SNIRH, a região dispõe de diferentes coberturas vegetais, sendo encontrados fragmentos de Cerrado no Alto e Médio São Francisco, Caatinga no Médio e Submédio e de Mata Atlântica no Alto São Francisco. Há ainda um forte contraste socioeconômico com áreas de riqueza elevada e grandes concentrações populacionais e áreas de pobreza crítica, onde se encontra uma população bastante dispersa.

Figura 3 – Localização da área de confluência dos três municípios.

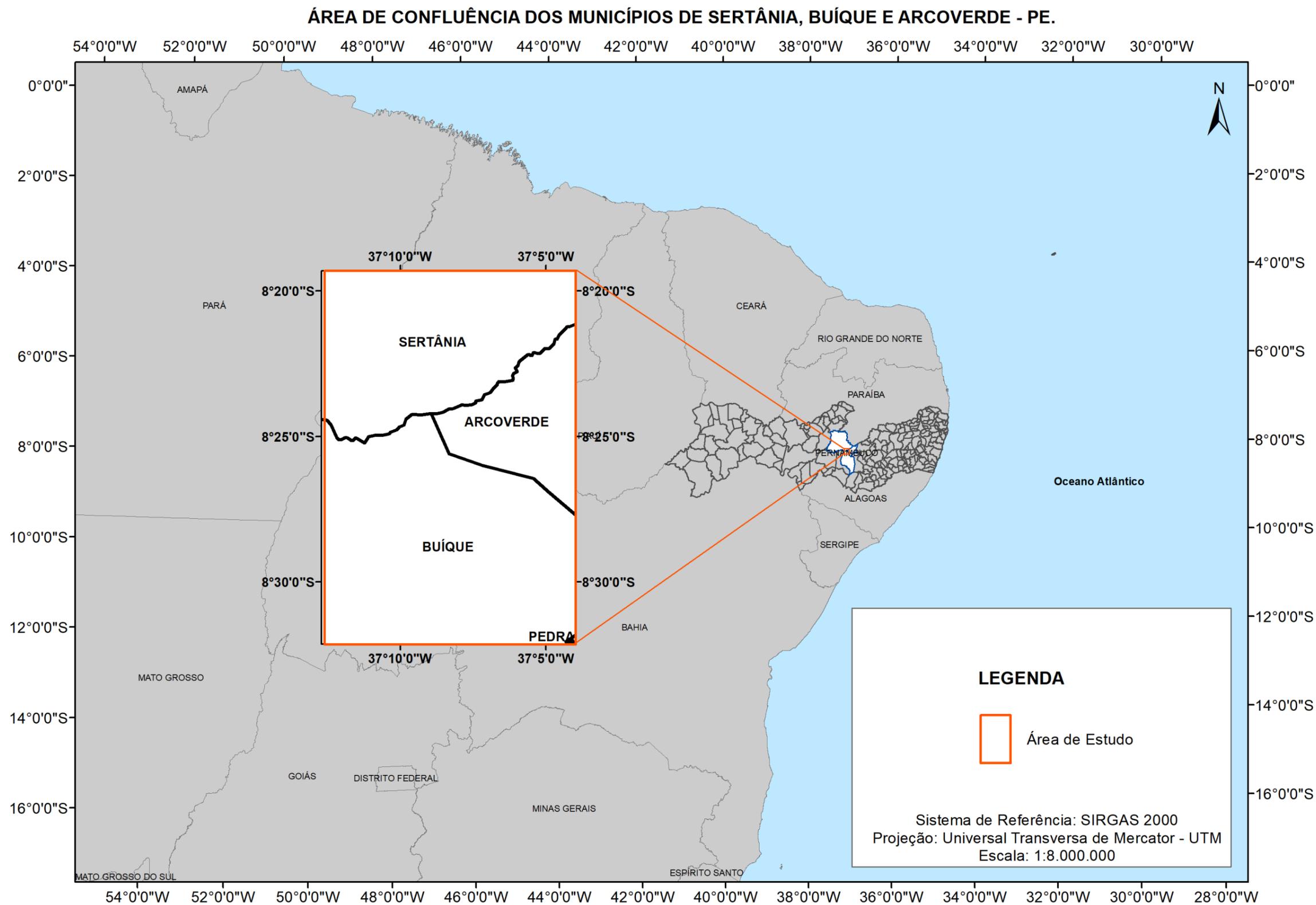
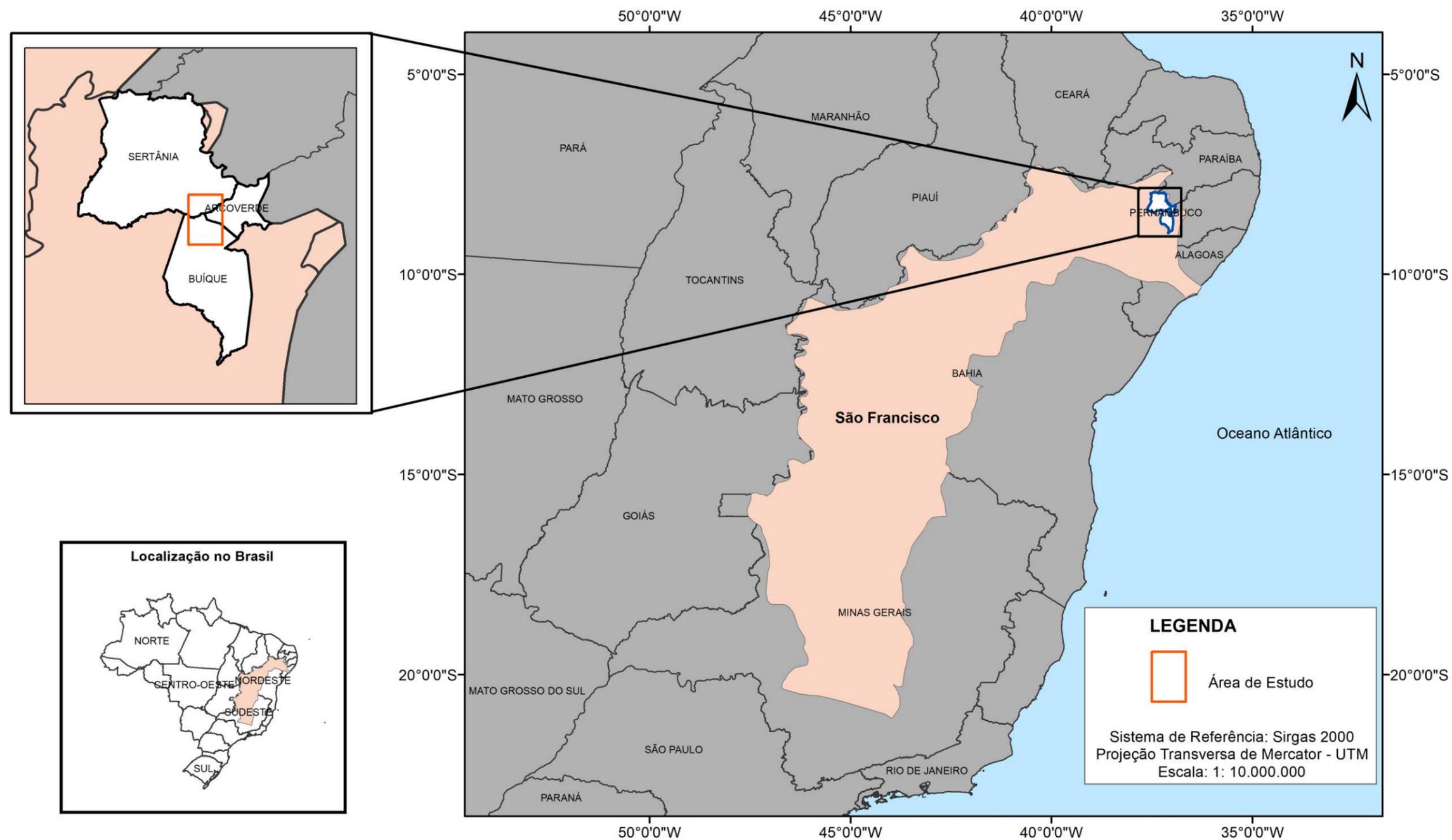


Figura 4 – Área de Confluência inserida na Região Hidrográfica do São Francisco

REGIÃO HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO



Conforme a EMBRAPA (2005), a precipitação na região alcança valores médios inferiores a 500mm anuais. Atrelado a isso, é observada uma alta taxa de evaporação que representa uma perda significativa na disponibilidade hídrica. Deste modo, os açudes que foram projetados para suprir a carência do semiárido não cumprem seu papel, pois acabam se tornando apenas um espelho d'água sujeito à evaporação, aumentando os processos de salinização do solo, devido à concentração de sólidos dissolvidos.

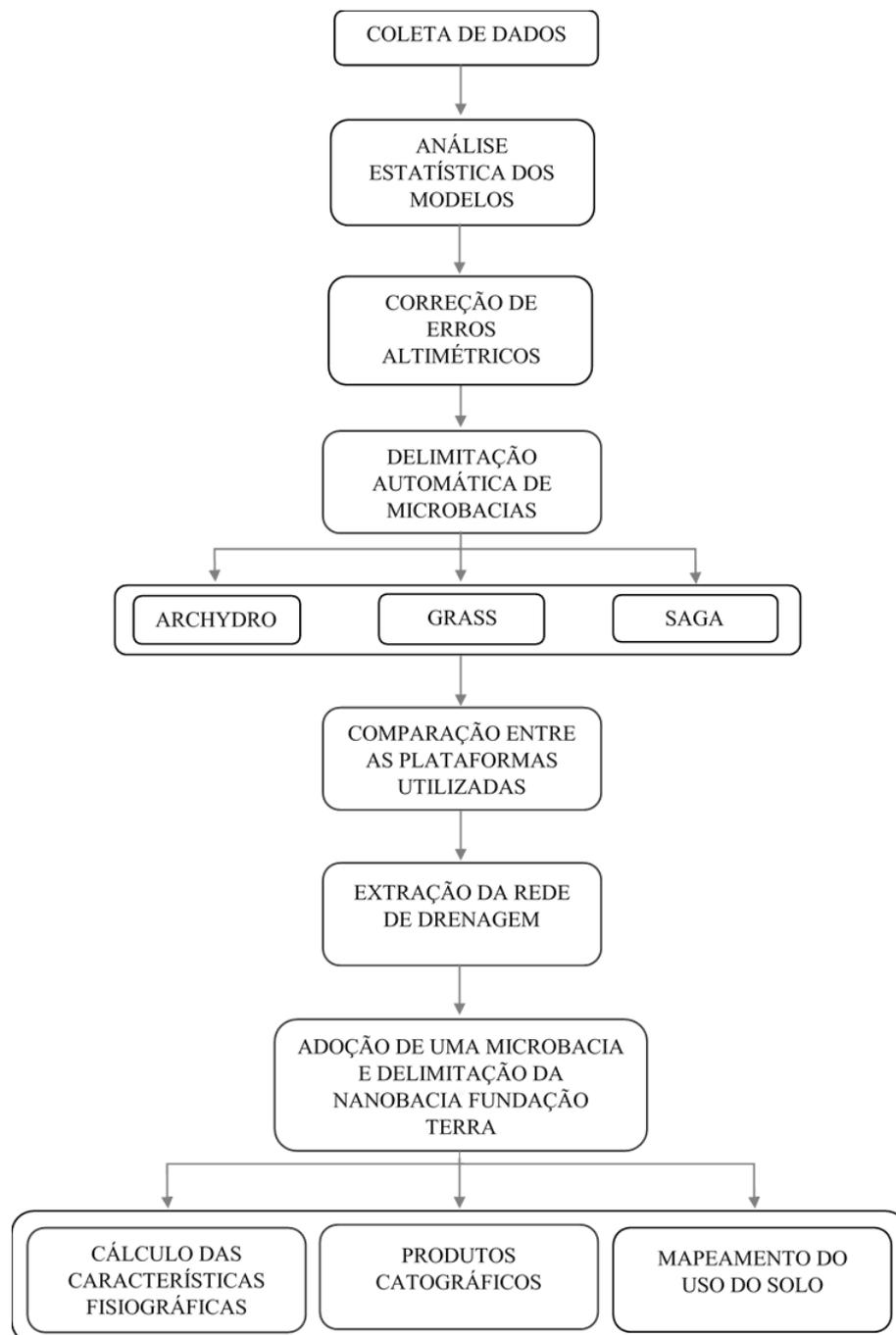
Diante do exposto, aplicar a esta região um novo conceito, que se apresenta como uma alternativa para contornar as dificuldades citadas, é tido como uma iniciativa de grande importância social e ambiental que considera, não só o comportamento dos fenômenos naturais existentes nesta extensão territorial, como também a interação das obras de infraestrutura para reter água das chuvas (PADILHA, ZANGHETIN & ORTEGA,2004).

9 METODOLOGIA DO TRABALHO

9.1. Procedimentos Metodológicos

Os processos desenvolvidos no trabalho encontram-se apresentados no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 – Etapas relativas à análise dos dados.



Fonte: Os Autores (2017)

9.1.1. Coleta de dados

Esta etapa consistiu na coleta da base de dados espaciais solicitadas à três instituições, possuindo, cada uma delas, resoluções espaciais distintas. A Figura 5 apresenta a partir de um quadro as informações coletadas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 5 – Base de dados coletadas em instituições distintas.

CONDEPE/ FIDEM	EMBRAPA	SUDENE
<ul style="list-style-type: none"> • MDT PE 3D – resolução espacial: 1m • Ortofotos PE 3D – resolução espacial de 50cm - escala : 1:5.000 	<ul style="list-style-type: none"> • MDS SRTM – resolução espacial: 90m. - escala: 1:250.000 	<ul style="list-style-type: none"> • Cartas topográficas – escala: 1:100.000

Fonte: Os Autores (2017)

9.1.2. Análise Estatística dos Modelos

Com o intuito de evidenciar possíveis discrepâncias entre os modelos de elevação e do terreno foram calculadas as estatísticas com relação ao valor altimétrico de cada um deles. Destacando o valor mínimo, o máximo, a média e o desvio padrão. Além disso, foi utilizada uma grade composta por 35 pontos igualmente espaçados, com intervalo de 5000m, para comparar as diferenças de altitudes entre os modelos. Para tanto, considerou-se as altitudes do MDT proveniente do PE 3D como verdadeiras, tendo em vista que o mesmo passou por um processo de validação realizado pelo Instituto Tecnológico de Pernambuco - ITEP e que trabalhos recentes publicados mostram que o modelo do SRTM possui muitas falhas. Para calcular as discrepâncias entre a coordenada altimétrica extraída do PE3D e a extraída dos modelos, utilizou-se o erro médio quadrático (EMQ), dado pela seguinte fórmula:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZPE3D - Z_{modelo})^2}{n}} \quad (1)$$

Onde, ZPE3D é a coordenada altimétrica do ponto oriundo do Programa Pernambuco Tridimensional, Zmodelo é a coordenada extraída de cada um dos modelos, n é o número de pontos utilizados e i é o i-ésimo ponto.

9.1.3 Correção de erros altimétricos nos dados

Os processos de correção dos erros altimétricos nos dados foram executados no ArcHydro, através da ferramenta *Fill Sinks* e no SAGA com a ferramenta *Fill Sinks* (Wang e Liu).

9.1.4 Delimitação Automática de Micro e Nanobacias Hidrográficas

Para a delimitação das micro e nanobacias, foram instalados três extensões: GRASS e SAGA no QGIS v.2.14 e ArcHydro Tools, utilizando a versão de avaliação do ArcGIS v.10.3, com o objetivo de comparar as metodologias a fim de obter o melhor resultado após análise. De maneira geral, as três extensões recondicionam o MDT aprofundando os pixels para localizar os cursos d'água existentes realizando as etapas apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Etapas de Delimitação Automática de Bacias.



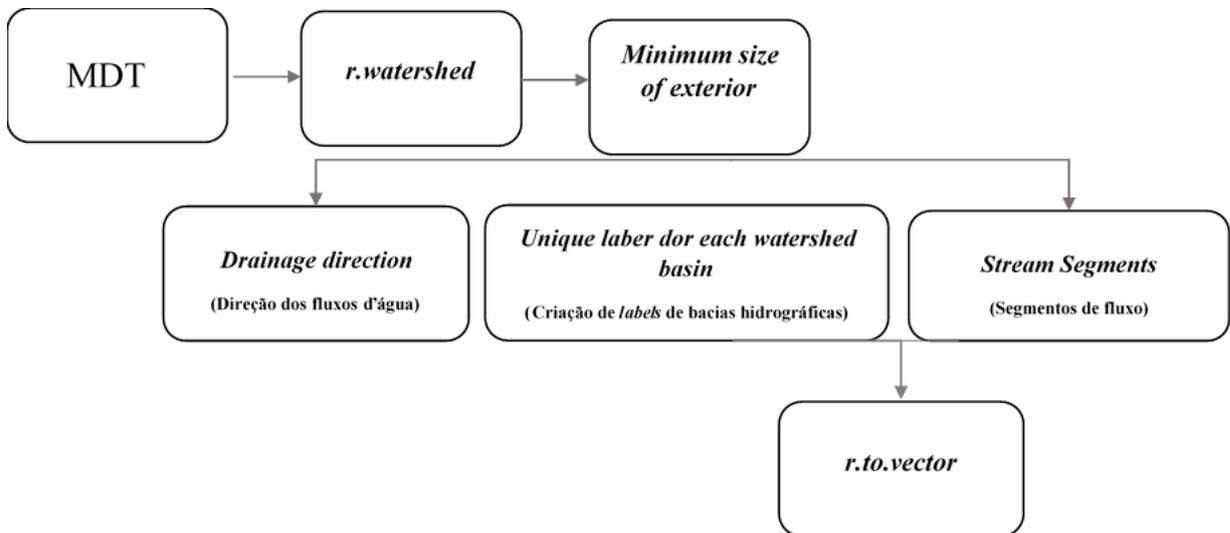
Fonte: Os Autores (2017).

Algumas ferramentas realizam mais de uma etapa em um único processamento e em outras, para cada etapa há um processamento individual. A metodologia empregada nas ferramentas GRASS, SAGA e ArcHydro são apresentadas a seguir.

- GRASS

O Fluxograma 2 apresenta as etapas utilizadas no processo de delimitação automática de bacias na extensão GRASS, no *software* QGIS.

Fluxograma 2 – Etapas seguidas no GRASS utilizando o *software* QGIS.



Fonte: Os Autores (2017)

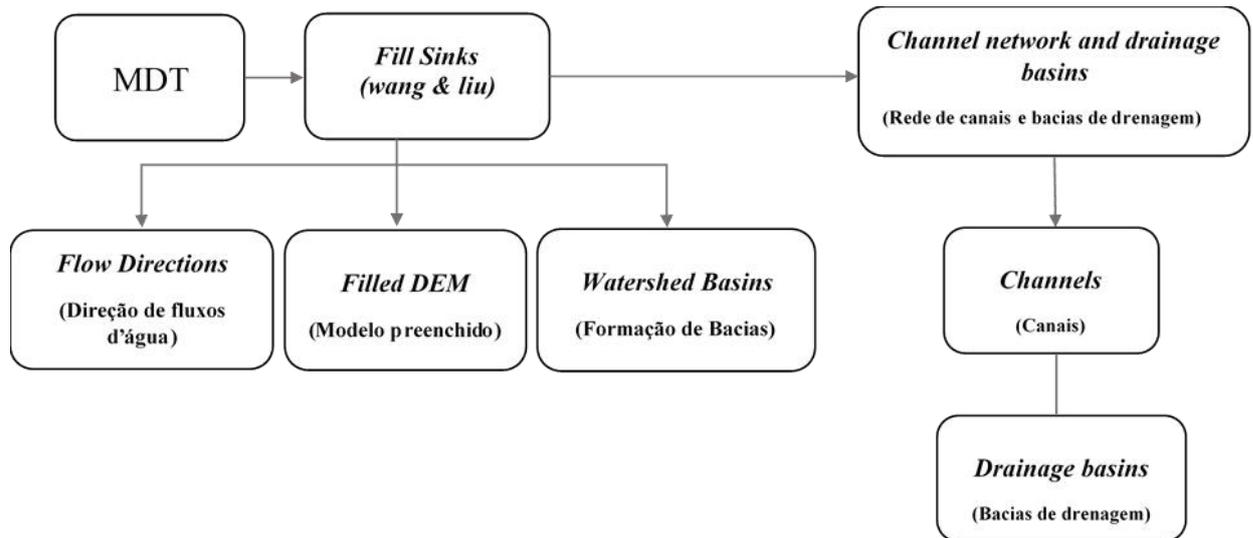
Após obter o MDT da área de estudo, utilizou-se o módulo *r.watershed* seguido de apenas um parâmetro essencial: *minimum size of exterior*, responsável pela adoção do limiar para a quantidade de células para formar uma bacia.

É habilitado nesta mesma caixa as ferramentas responsáveis pela geração de três produtos: a) *Drainage Direction* (direção do escoamento); b) *Unique Label for Each Watershed Basin* (identificação para as bacias hidrográficas); c) *Stream Segments* (criação dos segmentos dos fluxos - rede de drenagem). A transformação em vetor só se aplica nas ferramentas (b) e (c), utilizando utilizou-se o comando *r.to.vector* na plataforma própria do GRASS.

- SAGA

O Fluxograma 3 apresenta as etapas utilizadas no processo de delimitação automática de bacias na extensão SAGA, no *software* QGIS.

Fluxograma 3 – Etapas seguidas no SAGA utilizando o *software* QGIS.



Fonte: Os Autores (2017)

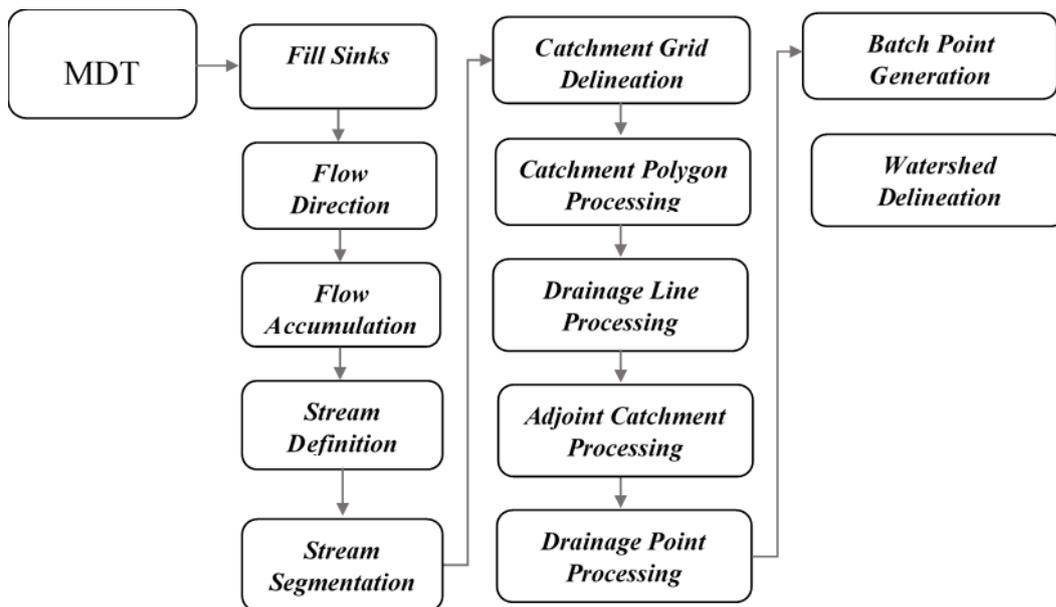
Inicialmente, utilizou-se a ferramenta *Fill Sinks*, onde foram identificadas e preenchidas as depressões da superfície nos MDT, determinando a direção do fluxo e a divisão das microbacias. Esta etapa resultou em 3 produtos em formato *raster*: a) *Filled DEM* b) *Flow Directions* e c) *Watershed Basins*.

A etapa seguinte consistiu na utilização da ferramenta *channel network and drainage basins*, responsáveis por gerar a rede de drenagem e as microbacias utilizando os resultados *Filled DEM* e *Watershed Basins*, respectivamente. Em seguida salvou-se como *shapefile*, transformando os arquivos em vetores.

- ArcHydro Tools

O Fluxograma 4 apresenta as etapas utilizadas no processo de delimitação automática de bacias na extensão ArcHydro, instalada na versão de atualização do *software* ArcGis.

Fluxograma 4 – Etapas seguidas no ArcHydro Tools utilizando a versão de avaliação no software ArcGIS.



Fonte: Os Autores (2017)

Iniciou-se o processamento partindo da ferramenta *Fill Sinks* para identificação e preenchimento de vazios, eliminando as irregularidades e saliências existentes no modelo. O *Flow Direction*, direção do fluxo, gerou um *raster* contendo a direção do fluxo de cada célula.

A partir desta última etapa, determinou-se a acumulação de fluxo, com a ferramenta *Flow Accumulation*. O *Stream Definition* foi a etapa dos testes dos limiares de acordo com a área da microbacia, este, segue o princípio em que quanto menor o número de células maior o nível de detalhe da drenagem a ser gerada. Seguindo para o *Stream Segmentation*, foram incluídos vários parâmetros para que ao fim resultasse na drenagem de acordo com seu fluxo. O *catchment grid delineation* é responsável por gerar as microbacias a partir do fluxo de drenagem gerado na etapa anterior. O *catchment polygon processing* gerou um arquivo vetor para cada microbacia.

Partindo para o *drainage line processing*, transformou-se a rede de drenagem gerada em vetor. Ao utilizar a ferramenta *adjoint catchment processing* permitiu a criação de novas microbacias um nível de detalhamento maior. Dando continuidade, utilizou-se o *drainage point processing* para marcação de pontos automáticos ao longo de todos os cursos d'água, com o intuito de posteriormente indicar manualmente o ponto do exutório com a ferramenta

batch point generation. Após a indicação, utilizou-se a ferramenta *watershed delineation* para a criar a microbacia definida a partir do ponto do exutório marcado.

9.1.5 Extração da Rede de Drenagem

Para a extração da rede de drenagem das microbacias, utilizou-se a calculadora raster do Arcgis, pois deste modo é possível controlar o limiar para determinação do valor dos pixels que serão considerados na criação dos cursos d'água.

A definição do limiar foi escolhida por tentativa e análise visual dos resultados obtidos, ficando estabelecido que seriam apresentados apenas os resultados que utilizaram pixels com valores superiores a 500 e a 20.000 do raster do *flow accumulation* para criação de um novo mapa com a rede de drenagem. Algebricamente, essas condições são geradas através das seguintes expressões matemáticas:

$$CON("Flow_Accumulation.tif" > 500, 1) \quad (2)$$

$$CON("Flow_Accumulation.tif" > 20000, 1) \quad (3)$$

A partir das condições (2) e (3), as células que não possuem valores superiores a 500 e 20.000 no *flow accumulation* serão transformadas em NODATA.

Após a criação do raster com os cursos d'água, o mesmo será transformado em *shapefile* através da ferramenta *Stream to feature* do menu *Hidrology* do *Spatial Analyst*.

9.1.6 Adoção de uma Micro e delimitação da Nanobacia Fundação Terra

Após a delimitação automática das microbacias foi adotada apenas uma como sendo a Microbacia da Fundação Terra para o estudo realizado. Em seguida, executou-se um novo processamento de delimitação automática, utilizando seu limite para definir as nanobacias hidrográficas.

9.1.7 Cálculo das Características Fisiográficas

Após a delimitação das bacias e extração da rede de drenagem, para a análise das características da micro e nanobacia hidrográfica foram considerados os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de Compacidade

Refere-se a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. Este coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente de seu tamanho

$$Kc = \frac{0,28 P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

Sendo,

Kc: coeficiente de compacidade;

P: perímetro (km);

A: área da bacia (km²).

Para a análise, conforme Silva & Mello (2008), podem-se classificar bacias hidrográficas função do valor de Kc da seguinte forma: Quanto mais próximo da unidade for este coeficiente, mais a bacia se assemelha a um círculo. Assim, pode-se interpretá-lo da seguinte forma:

$1,00 \leq Kc < 1,25$ – bacia com alta propensão a grandes enchentes;

$1,25 \leq Kc < 1,50$ – bacia com tendência mediana a grandes enchentes;

$Kc \geq 1,50$ – bacia não sujeita a grandes enchentes.

- Índice de Circularidade

Este índice tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma se torna alongada. Para isso, utilizou-se a seguinte equação.

$$Ic = \frac{12,57 A}{P^2} \quad (5)$$

Sendo,

Ic: índice de circularidade;

P: perímetro (m);

A: área de drenagem (m²).

Segundo Schumm (1956), de acordo com o valor reportado do I_c , as bacias podem ser caracterizadas da seguinte forma:

$I_c = 0,51$ possuem escoamento superficial moderado e pequena probabilidade de cheias rápidas;

2. $I_c > 0,51$ demonstra uma bacia circular favorecendo os processos de inundação;

3. $I_c < 0,51$ bacia mais alongada favorecendo o escoamento superficial.

- Fator de forma

Neste item, relaciona-se a forma da bacia com a de um retângulo, correspondendo à razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo do espigão). Atua, principalmente, sobre o comportamento hidrológico da bacia utilizando-se a seguinte equação:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

Sendo,

K_f : fator de forma;

A: Área da bacia (km²);

L: comprimento do curso principal da bacia (km).

Este índice expressa a probabilidade que a bacia pode ter enchentes. Quanto mais próximo de um (1) os resultados obtidos através da fórmula, maior a propensão a enchentes, pois, a bacia fica cada vez mais próxima de um quadrado e com maior concentração do fluxo.

- Densidade de drenagem

O estudo do sistema de drenagem aponta a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, sendo, desta forma, o índice que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (7)$$

Sendo,

Dd: Densidade de drenagem (m/m²);

L: o comprimento total dos cursos da bacia (km);

A: área de drenagem (km²).

Segundo Carvalho e Silva (2006), para avaliar este item, as microbacias podem ser caracterizadas da seguinte forma:

Bacias com drenagem pobre → $Dd < 0,5 \text{ km/km}^2$

Bacias com drenagem regular → $0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$

Bacias com drenagem boa → $1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$

Bacias com drenagem muito boa → $2,5 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$

Bacias excepcionalmente bem drenadas → $Dd \geq 3,5 \text{ km/km}^2$

- Tempo de concentração

Segundo Silveira (2005), o tempo de concentração é definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial em um determinado ponto de controle. Foi utilizada a fórmula de Ventura, onde ainda segundo Silveira (2005) é utilizada para cálculo de pequenas bacias em áreas rurais.

$$Tc = 0,127 \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (8)$$

Sendo,

A = área da bacia, em km²;

I = declividade média do curso d'água principal, em m/m.

9.1.8 Mapeamento do Uso do Solo

Com a realização da delimitação e análise das bacias, foi verificado quais o uso e ocupação do solo existentes nas mesmas, através da vetorização das feições por meio da confecção de um mosaico executado com as ortofotos do Programa Pernambuco Tridimensional. Foram demarcadas as áreas de vegetação arbórea e rasteira, rede viária, açudes e mancha habitacional em formato *shapefile* no *software* Arcgis.

9.2. Base da Dados Espaciais

- **Cartas Topográficas SUDENE**

Utilizaram-se cartas topográficas na escala de 1:100.000, cobrindo a área formada pelos municípios de Arcoverde, Buíque e Sertânia. Estas pertencem às décadas de 70 e 80, tendo sido produzidas pelo IBGE - Instituto Brasileiro de Geoestatística e pela DSG - Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro, com base nas normas do Mapeamento Sistemático Nacional.

As cartas foram disponibilizadas pela SUDENE - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste em formato analógico no Sistema Geodésico de Referência Córrego Alegre e vetorizadas para que as curvas de nível pudessem ser utilizadas para gerar um modelo digital do terreno através do algoritmo TIN.

- **Modelo Digital do Terreno PE 3D**

Os modelos digitais do terreno foram obtidos junto à agência estadual CONDEPE/FIDEM, que disponibilizou os dados oriundos do Programa Pernambuco Tridimensional.

As folhas adquiridas possuem articulação compatível com a escala de 1:5000, estando disponíveis com resolução espacial de 1m e georreferenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro SIRGAS2000, com sistema de projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM). As mesmas passaram por um processo de mosaicagem para compor a área de estudo.

- **Modelo Digital de Superfície SRTM**

Os modelos digitais de superfície foram obtidos no site da EMBRAPA, através da coleção Brasil em Relevo. Utilizaram-se quatro folhas na escala de 1: 250.000, no formato GEOTIFF e com resolução espacial de 90m, no sistema de coordenadas geográficas e datum WGS-84.

- **Ortofotos**

As ortofotos foram obtidas junto à Agência CONDEPE/FIDEM, oriundas do Programa Pernambuco Tridimensional, que incluiu também o recobrimento aerofotogramétrico do Estado. Os dados foram validados pelo Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP) e disponibilizados pela agência com escala de 1:5.000 e GSD de 50cm, sendo necessário, no entanto, reamostrá-los para 1m devido à necessidade de reduzir o tempo de processamento das operações tendo em vista que os procedimentos executados utilizando a resolução espacial original dos dados demandavam uma alta exigência computacional.

10. RESULTADOS E DISCUSSÕES

10.1 Análise comparativa entre os modelos

As estatísticas foram calculadas com o intuito de evidenciar as diferenças altimétricas entre os modelos do ponto de vista quantitativo, levando em consideração que os mesmos foram obtidos por diferentes tecnologias.

Tabela 2 – Estatísticas dos dados utilizados.

Dado	Valor Mín. (m)	Valor Máx. (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)
MDT PE 3D (Resolução espacial -1 m)	453,00000	1072,00000	713,54455	113,93901
SRTM (Resolução espacial - 90 m)	459,00000	1068,00000	717,43157	113,68586
MDT_INTERPOLADO (Resolução espacial - 50 m)	455,34259	1050,00000	712,91257	111,95631

Fonte: Os Autores (2017).

Observa-se na Tabela 2 que para a comparação realizada não executou-se a amostragem dos dados para que os mesmos ficassem com uma mesma resolução espacial, pois, desta forma, acrescentaria-se mais uma fonte de erros às informações, fugindo assim do escopo do trabalho. Pode-se verificar que apesar dos diferentes tamanhos de pixels, os dados não divergem significativamente com relação às estatísticas analisadas. Este resultado fica confirmado através da análise das discrepâncias apresentadas na Tabela 3 com o uso do EMQ, onde percebe-se também que as elevações do MDT gerado através do TIN com base nas curvas de nível da carta topográfica, possui uma maior divergência altimétrica em relação aos dados do PE3D quando comparada com o MDT da SRTM.

Tabela 3 – EMQ entre os dados.

Dados Comparados	EMQ (m)
PE3D – SRTM	12
PE3D – MDT TIN	17

Fonte: Os Autores (2017)

Pode-se inferir ainda, a partir das Tabelas 2 e 3, que os modelos utilizados neste trabalho não possuem grandes picos ou depressões, tendo em vista que, de acordo com a carta topográfica dos municípios, os valores máximos e mínimos estão em conformidade com a realidade topográfica da região.

Com relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), definido pelo Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984, existem dois métodos de avaliação da precisão altimétrica dos produtos cartográficos: um deles pelo cálculo do erro médio quadrático e outro pelo cálculo da tolerância vertical. Porém, ambos sofrem influência da escala e do espaçamento entre as curvas de nível do produto. A Tabela 4 apresenta os valores do EMQ tolerados para as escalas dos produtos estudados de acordo com o PEC.

Tabela 4 – Valores EMQ de acordo com o PEC

PEC - Classes	MDS SRTM (Escala 1:250.000, Eqd =100 m)	MDT TIN (Escala: 1:100.000, Eqd = 50m)
	EMQ (m)	EMQ (m)
A	33,00	16,67
B	40,00	20,00
C	50,00	25,00

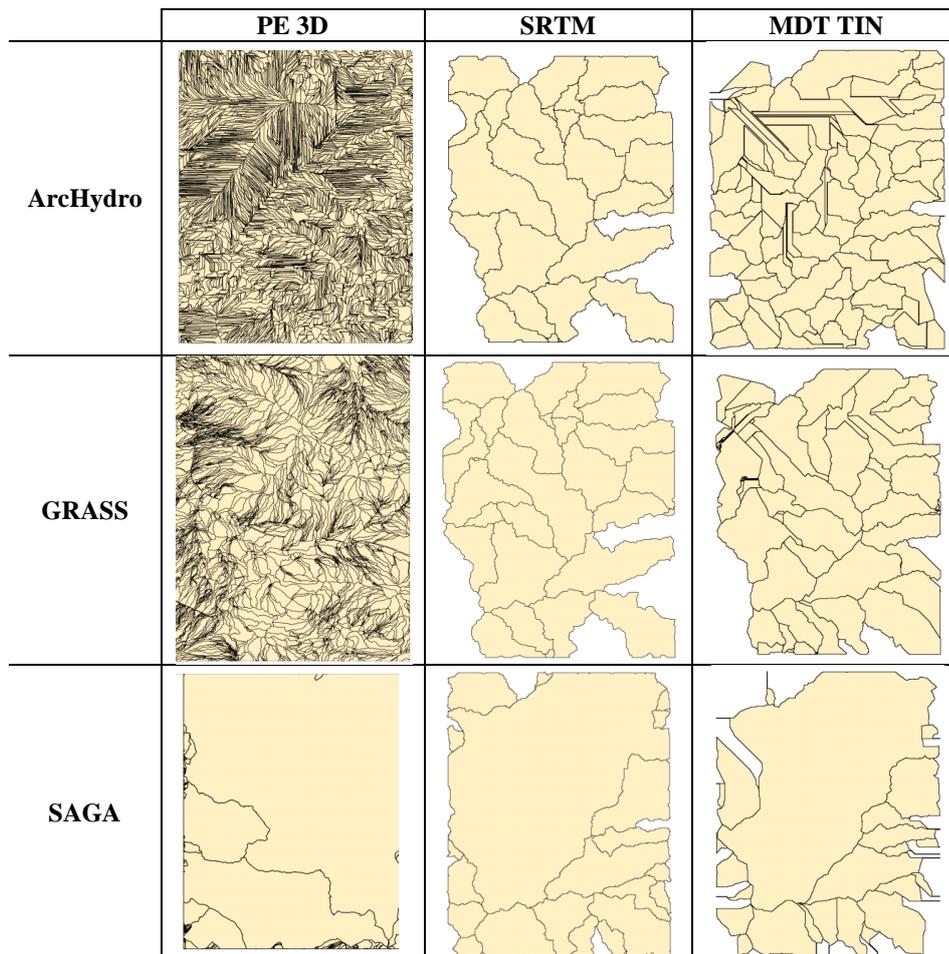
Fonte: Os Autores (2017).

Associando os resultados das Tabelas 3 e 4 percebe-se que o MDS SRTM (que possui escala de 1:250.000 e equidistância entre as curvas de nível de 100 metros) pode ser classificado como PEC classe A, sendo o valor do EMQ do SRTM inferior a 33 metros; enquanto que o MDT TIN (escala de 1:100.000 e curvas de nível com 50 metros de equidistância) pode ser classificado como PEC classe B, pois seu EMQ foi superior a 16,67 metros e inferior a 20,00 metros.

10.2 Delimitação Automática de Microbacias

A delimitação automática de microbacias foi realizada a princípio com um mesmo limiar para as três fontes de dados utilizadas, visando evidenciar o quanto a resolução espacial dos dados influencia neste processo. Com exceção da ferramenta de delimitação do SAGA, o ArcHydro e o GRASS solicitam ao usuário o número de células do MDT ou MDS que será empregado para formar uma microbacia. Nesta etapa foram utilizadas 2000 células e os resultados mostraram o que já era esperado: com o uso do MDT proveniente do PE 3D foi possível extrair uma quantidade de bacias infinitamente superior ao número de bacias derivadas dos demais modelos (Figura 7).

Figura 7 – Delimitação das microbacias nas ferramentas ArcHydro e GRASS (limiar de 2000) e SAGA (sem limiar).



Fonte: Os Autores (2017)

As ferramentas de delimitação funcionam da seguinte maneira: à medida que aumenta-se o limiar utilizado na determinação da bacia, um menor número de unidades são formadas. Sendo, no entanto, o tamanho da bacia modelada dependente do tamanho do pixel do dado raster. Conforme apresentado na Tabela 5, com o valor de 2000 células, para o MDT do PE 3D foram geradas bacias com aproximadamente 2000m² (equivalente a 0,002ha), já que um pixel deste dado tem resolução de 1m e área de 1m². Para o SRTM, formaram-se bacias por volta de 16.200.000,00 m² (equivalente a 16,2ha), tendo em vista que o pixel deste dado tem 90m de resolução e área de 8.100,00m². Enquanto que para o MDT gerado através do algoritmo TIN, foram produzidas bacias com cerca de 5.000.000,00m² (equivalente a 5ha), considerando a resolução de 50m e área de 2.500,00m² para uma célula do modelo.

Tabela 5 – Áreas das MBH esperadas utilizando o limiar de 2000 células.

ÁREAS DAS MBH FORMADAS → 2000 CÉLULAS	
MDT PE 3D	2.000,00m ²
MDS SRTM	16.200.000,00m ²
MDT TIN	5.000.000,00m ²

Fonte: Os Autores (2017)

As Tabelas 6 e 7 apresentam as dimensões de uma amostra das unidades territoriais criadas pelas ferramentas do GRASS e ArcHydro, onde verifica-se que mesmo estabelecendo um limiar para formação das mesmas, as áreas das bacias delimitadas ficam próximas aos valores esperados (apresentados na Tabela 5), algumas maiores e outras menores, pois consideram-se as limitações topográficas do relevo, tendo em vista que o contorno da bacia é construído pelas linhas de divisores d'água.

A variação máxima admitida para a dimensão da microbacia deve ser estipulada pelo usuário a partir da análise das áreas formadas. Caso o usuário considere que a unidade está com dimensão muito superior a pré-estabelecida e tenha notado posteriormente, através de análise visual dos cursos d'água, que existe a possibilidade desta ser dividida, o mesmo poderá delimitar uma nova microbacia semiautomaticamente através da marcação de pontos que correspondam ao exutório de cada subunidade desejada.

Tabela 6 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas pelas ferramentas do ArcHydro.

Amostra de Microbacias	PE3D	SRTM	MDT TIN
MBH1	2221,00 m ²	14.388.235,25 m ²	5.285.000,00 m ²
MBH2	2150,00 m ²	24.543.124,24 m ²	7.597.500,00 m ²
MBH3	4217,00 m ²	11.217.510,32 m ²	1.312.500,00 m ²
MBH4	2784,00 m ²	20.421.181,99 m ²	1.537.500,00 m ²
MBH5	3359,00 m ²	23.600.476,56 m ²	5.312.500,00 m ²

Fonte: Os Autores (2017)

Tabela 7 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas pela ferramenta do GRASS.

Amostra de Microbacias	PE3D	SRTM	MDT TIN
MBH1	2720,00 m ²	14.388.235,25 m ²	3.468.000,00 m ²
MBH2	1710,00 m ²	24.543.124,24 m ²	4.555.000,00 m ²
MBH3	2164,00 m ²	11.217.510,32 m ²	2.807.500,00 m ²
MBH4	5041,00 m ²	20.421.181,99 m ²	3.165.000,00 m ²
MBH5	2290,00 m ²	23.600.476,56 m ²	3.780.000,00 m ²

Fonte: Os Autores (2017)

Na Tabela 8, observam-se as dimensões das amostras geradas no SAGA, onde os limites são formados sem que seja informado o número de células utilizadas no processo, de modo que as áreas são definidas aleatoriamente. Verificou-se ainda que a ferramenta não consegue identificar corretamente os pontos de acumulação de fluxo dos cursos d'água, gerando unidades com grandes dimensões.

Tabela 8 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas pelas ferramentas do SAGA.

Amostra de Microbacias	PE3D	SRTM	MDT TIN
MBH1	2431,00 m ²	6.706.232,14 m ²	3.545.000,00 m ²
MBH2	3330,00 m ²	480.988.220,00 m ²	429.930.000,00 m ²
MBH3	82.124.113,00 m ²	4.431.356,42 m ²	1.737.500,00 m ²
MBH4	29.193,00 m ²	14.080.550,45 m ²	2.440.000 m ²
MBH5	221,00 m ²	52.525.104,00	38.050.000,00 m ²

Fonte: Os Autores (2017)

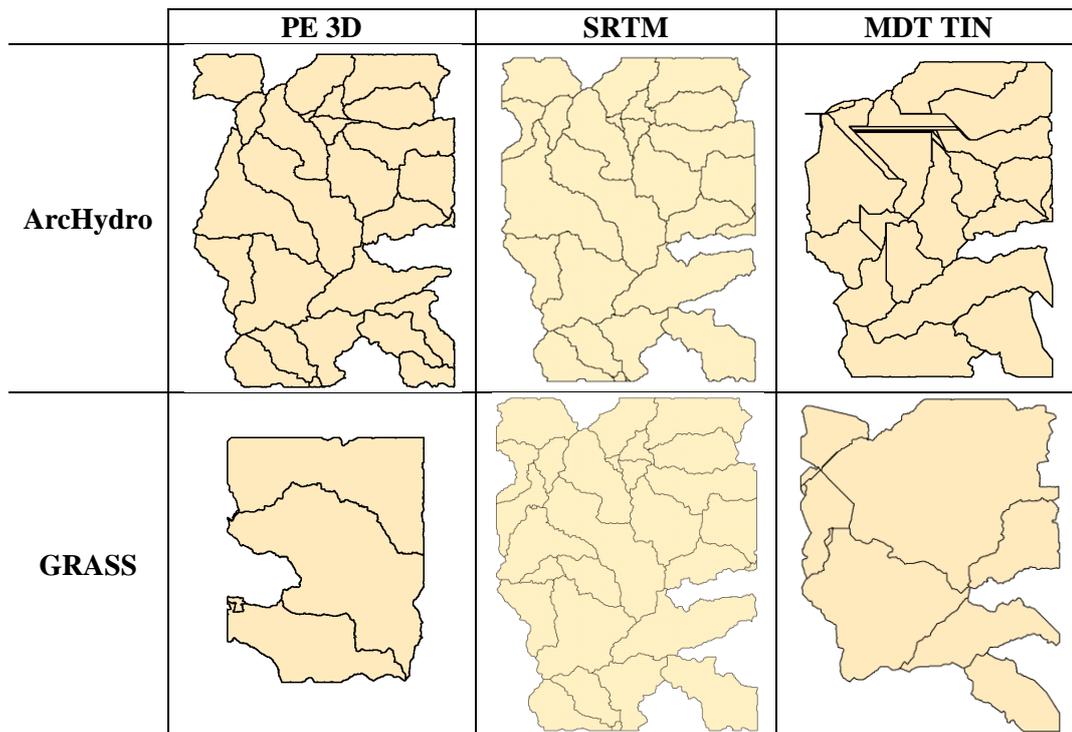
O Conceito Base Zero estabelece as dimensões mínimas das micro e nanobacias hidrográficas na área de estudo para que possam ser mantidas as condições de sustentabilidade e manejo em cada uma das unidades de planejamento. Esse limite mínimo, como já citado anteriormente, ficou definido como 2000ha para as micro e 500ha para as nanobacias.

Desta forma as ferramentas foram novamente utilizadas, agora com limiares diferentes, de modo que para cada modelo criaram-se microbacias com esta especificação. No caso dos dados oriundos do PE 3D foi adotado um limiar de 20.000.000 de células, para o SRTM, 2.000 e para o MDT TIN, 8.000. Os resultados destes processamentos nas ferramentas do ArcHydro e GRASS são apresentados na Figura 8. Como o SAGA não permite a escolha do limiar, optou-se por não apresentar novamente seus produtos.

A partir da análise dos resultados, percebe-se que a delimitação realizada para os dados do PE 3D e SRTM foi praticamente idêntica, com exceção do resultado obtido para a ferramenta do GRASS com o MDT do PE 3D, pois para que o processamento fosse executado, precisou-se restringir a área de estudo fazendo um recorte menor do modelo, devido à limitação da mesma em efetuar procedimentos que demandam uma grande exigência computacional. Com o recorte, informações altimétricas foram perdidas, fazendo com que a ferramenta não conseguisse mais identificar os pontos de acumulação de fluxo e gerasse microbacias com áreas superiores as esperadas.

Observa-se ainda que para o MDT gerado a partir da estrutura vetorial TIN, o ArcHydro apresentou falhas na delimitação das microbacias. Estas falhas podem ser explicadas pela falta de informação altimétrica entre as curvas de nível usadas para gerar o modelo, ocasionando o surgimento de perfis planos. Como os dados hidrológicos derivam desta rede vetorial formada pelo TIN, as unidades territoriais acabam refletindo este erro da base inicial. Já o GRASS criou microbacias de dimensões superiores às especificadas por também não ter conseguido identificar corretamente os pontos de acumulação de fluxo.

Figura 8 – Resultados dos processamentos adotando diferentes limiares para os modelos estudados.



Fonte: Os Autores (2017)

As Tabelas 9 e 10 apresentam as áreas de uma amostra de microbacias geradas com a definição de diferentes limiares para as duas ferramentas.

Tabela 9 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas com diferentes limiares no ArcHydro.

Amostra de Microbacias	PE3D	SRTM	MDT TIN
MBH1	20.472.748,00 m ²	20.421.181,98 m ²	21.817.500,00 m ²
MBH2	23.655.089,00 m ²	24.303.177,54 m ²	26.610.000,00m ²
MBH3	24.414.131,00 m ²	24.543.124,24 m ²	25.907.500,00 m ²
MBH4	34.333.648,00 m ²	36.634.726,25 m ²	38.835.000,00 m ²
MBH5	29.015.873,00 m ²	28.776.470,36 m ²	30.245.000,00 m ²

Fonte: Os Autores (2017)

Tabela 10 – Áreas de uma amostra de microbacias geradas com diferentes limiares no GRASS.

Amostra de Microbacias	PE3D	SRTM	MDT TIN
MBH1	21.327.506,00 m ²	20.387.199,41 m ²	290.426.875,00 m ²
MBH2	1,00 m ²	24.151.526,75 m ²	145.897.812,50 m ²
MBH3	46.878.343,00 m ²	24.433.772,02 m ²	2.187,50 m ²
MBH4	35.333.941,00 m ²	38.227.848,80 m ²	32.761.562,50 m ²
MBH5	399.389,00 m ²	29.014.179,30 m ²	59.031.562,50 m ²

Fonte: Os Autores (2017)

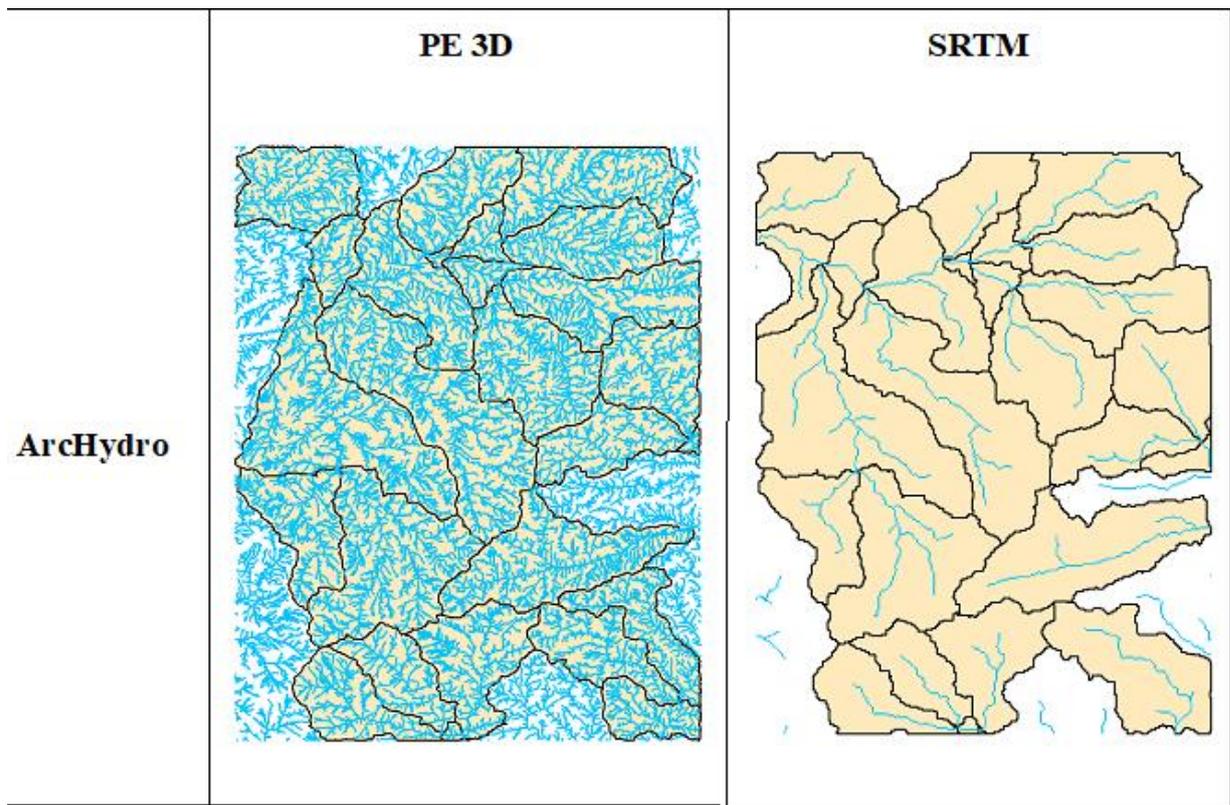
É importante destacar ainda que a MBH2 formada a partir do MDT do PE3D no GRASS (Tabela 10) pode corresponder a um erro do tipo *sink*, já que com o recorte do MDT perderam-se informações altimétricas e uma depressão brusca deve ter sido identificada pela ferramenta como uma microbacia, o que explica a área de 1m² nesta unidade.

10.3 Extração da Rede de Drenagem

Para a extração da rede de drenagem foram considerados apenas os resultados da delimitação das microbacias realizada no ArcHydro pelos modelos do PE 3D e SRTM por terem apresentado contornos e áreas semelhantes.

Com o uso da calculadora raster, à medida que aumenta-se o limiar adotado na extração da drenagem, omitem-se cursos d'água de menor porte. Foram utilizados pixels com valores de entrada superiores a 500 no raster *flow accumulation* gerado com o uso do modelo da SRTM e 20.000 no raster gerado com o PE 3D. Aqui vale destacar mais uma vez a influência da resolução espacial na realização do processamento, uma vez que, teoricamente, a rede de drenagem criada por este último deveria ser menos densa do que a formada pelo primeiro, o que não foi constatado nos resultados, como pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Resultados da extração da rede de drenagem com os dados do PE 3D (limiar de 20.000) e da SRTM (limiar de 500).



Fonte: Os Autores (2017)

Por ter uma melhor resolução espacial, o grau de generalização das informações representadas em um pixel do PE 3D é menor do que o da SRTM. Logo, mesmo utilizando um limiar 40 vezes maior (o que deveria omitir alguns cursos), o primeiro apresentou uma extração de uma rede muito mais densa, sendo possível visualizar além dos rios principais, os talvegues dos riachos de menor porte. Este resultado mostra-se mais interessante no contexto do Conceito Base Zero, no sentido de representar a rede de drenagem permanente e intermitente das microbacias, evidenciando a potencialidade hídrica da região, apesar dos longos períodos de seca. Desta forma, dispõem-se de mais opções de talvegues para a construção dos barramentos de pedra, aumentando o rendimento no armazenamento e distribuição da água para a população rural.

10.4 Adoção de uma Microbacia e Delimitação das nanobacias para a Fundação Terra

Como relatado no item anterior, a escolha do PE 3D para geração dos produtos finais ocorreu devido ao ganho na qualidade destes por consequência de uma melhor e diferenciada

resolução espacial. De forma a atender as especificações exigidas no CBZ, os processamentos voltados às delimitações das micro e nanobacias no *ArcHydro* se mostraram menos limitados ao efetuar o carregamento de uma grande demanda de dados.

A adoção de uma microbacia da Fundação Terra ocorreu com a sobreposição dos *shapefiles* das edificações da referida instituição, obtidas após a vetorização das ortofotos (dado do PE 3D), no Sistema de Referência SIRGAS 2000/Fuso 24, configuração equivalente aos *shapefiles* criados na delimitação automática.

Após a determinação da microbacia, realizou-se novamente o processo automático de delimitação aplicado apenas ao seu limite para dividir a mesma em nanobacias hidrográficas. Nesta nova etapa utilizou-se um limiar de 4.500.000 células para formação das subunidades com áreas aproximadas de 5.000.000 m² (equivalente a 500ha). No entanto, com respeito ao traçado dos divisores d'água e à topografia local, as áreas das nanobacias delimitadas foram superiores ao pré-estabelecido (Tabela 11).

A Figura 10 apresenta a microbacia da Fundação Terra e a Figura 11 o resultado da delimitação de suas subunidades com destaque para a NBH1, adotada como sendo a nanobacia da instituição.

Figura 10 – Escolha da Microbacia da Fundação Terra.

Mapa de Identificação da MBH Fundação Terra

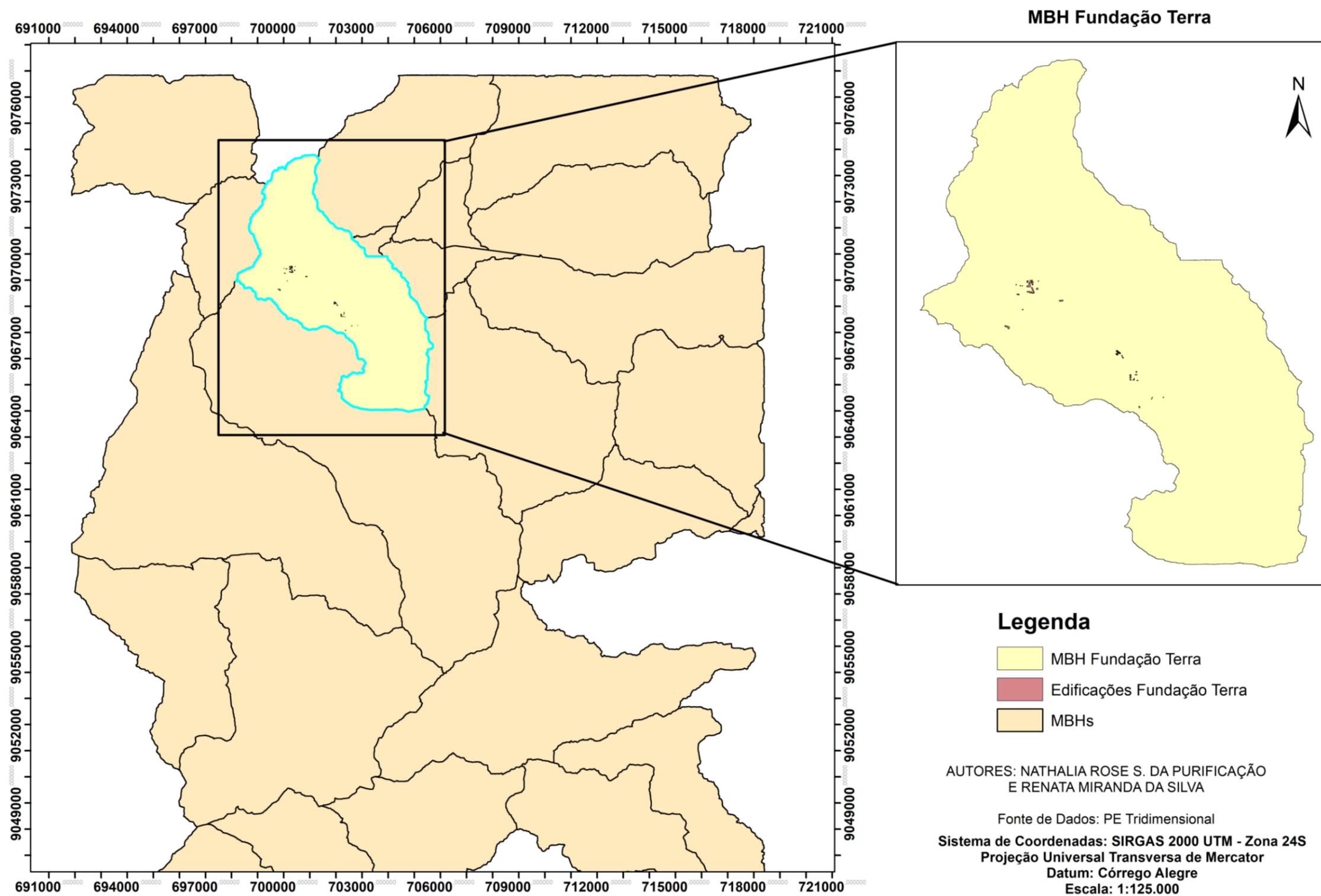


Figura 11 – Resultado da Delimitação das Nanobacias e Escolha da Subunidade da Fundação Terra.

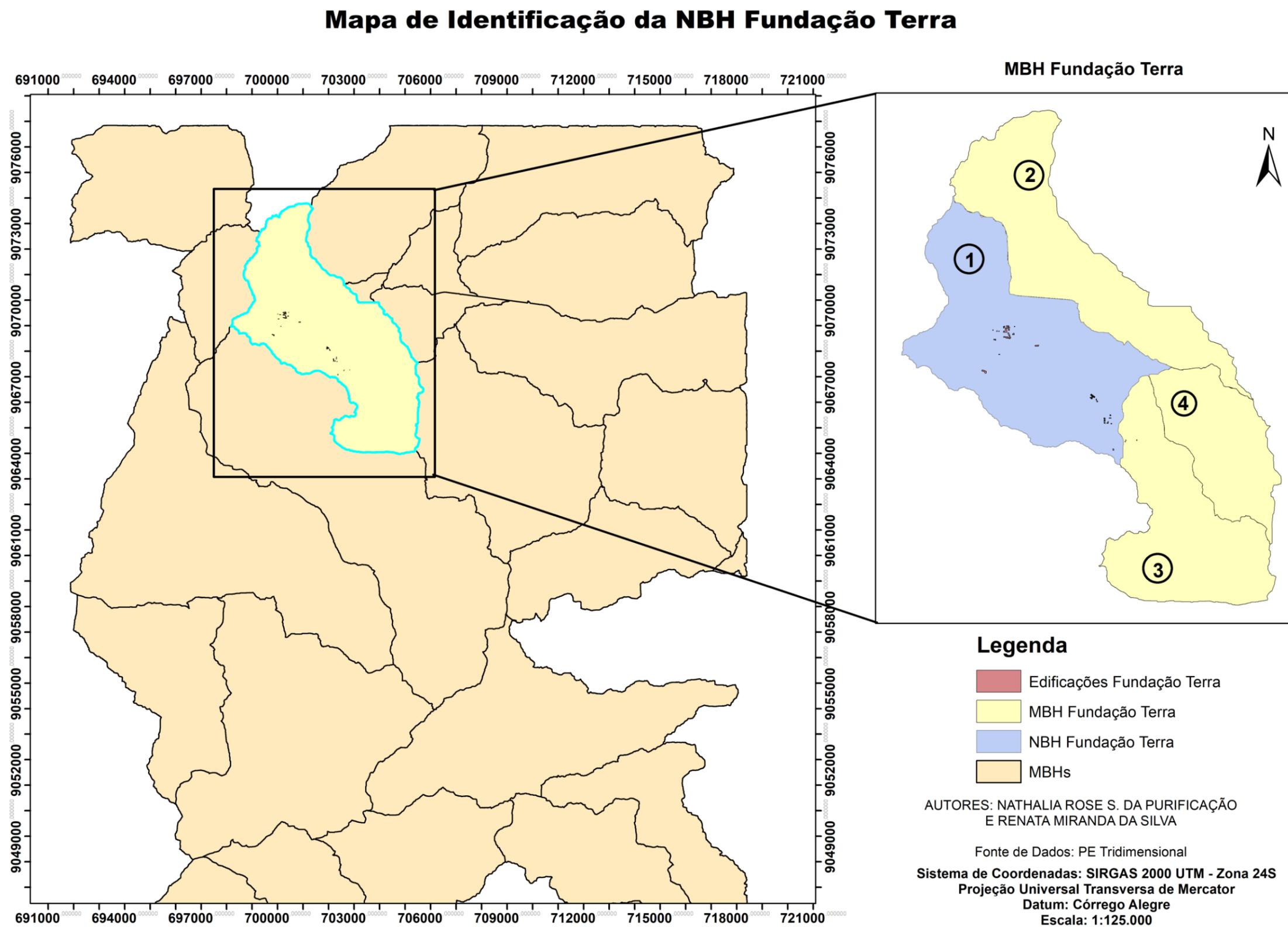


Tabela 11 – Área das Nanobacias Hidrográficas da Fundação Terra.

Identificação	Áreas
NBH1	1.202,56ha
NBH2	772,22ha
NBH3	483,88ha
NBH4	908,87ha

Fonte: Os Autores (2017)

10.5 Cálculo das Características Fisiográficas da Micro e Nanobacia adotadas

- **Microbacia Hidrográfica Fundação Terra**

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos após o cálculo das características fisiográficas da microbacia em estudo.

Tabela 12 – Características fisiográficas da Microbacia Hidrográfica Fundação Terra.

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Área da microbacia (km ²)	34,33
Perímetro da microbacia (km)	42,42
Coefficiente de compacidade (Kc)	2,03
Índice de circularidade (Ic)	0,24
Fator de Forma (Kf)	0,32
Densidade de drenagem (km.km-2)	4,83
Tempo de concentração (horas)	7,53

Fonte: Os Autores (2017)

Os itens a seguir apresentam a análise de cada resultado obtido, associando o valor numérico dos coeficientes demonstrados à realidade da região.

- **Área da microbacia**

A microbacia delimitada possui área de 34,33km², equivalente à 3433ha. Este é o item básico para o cálculo das outras características físicas. Ao efetuar a delimitação automática da microbacia, nomeada de Microbacia Hidrográfica Fundação Terra – MBH Fundação terra – foram seguidas as especificações exigidas no projeto piloto, descrito no item 6.1, e, concomitantemente, respeitando os limites da topografia local.

- **Perímetro da microbacia**

O perímetro constituiu no comprimento da microbacia delimitada na superfície. Sua relevância está em avaliar outras características, o perímetro da MBH Fundação Terra se deu em 42,42km.

- Coeficiente de compacidade (Kc)

Seguindo os parâmetros adotados no item 8.1.4, o resultado obtido foi de 2,03. Neste item, o valor maior mostra-se maior que 1,5 e, desta forma, estas são menos compactas. Desta forma, o valor alcançado mostra que a região em questão não é susceptível a inundações e nem a concentração de água durante o processo de escoamento, concluindo que a mesma não está sujeita a grandes enchentes.

- Índice de circularidade (Ic)

O índice de conformação expressa a capacidade da microbacia em ter enchentes. Quanto mais próximo de 1, maior a propensão a esta eventualidade. O valor obtido de 0,24 comprova o item anterior, no qual deixa claro que a área possui pouca probabilidade de picos de enchentes, por ser menor que 0,51, indica que a microbacia tende a ser mais alongada em relação a nascente com a sua foz, contribuindo para o seu processo de escoamento.

- Fator de Forma (Kf)

Com o coeficiente resultante de 0,32, é possível combinar este valor com o apresentado anteriormente. Sabendo que a microbacia em questão tende a um formato alongado, é possível relacionar ao fato do fator de forma ser menor que 0,5 o que deixa claro que a área de estudo é menos propensa a enchentes, uma vez que se torna menos provável que uma chuva intensa possa abranger toda a sua área.

- Densidade de drenagem (Dd)

A densidade de drenagem apresentou um valor de 4,83 km.km⁻², ou seja, um índice maior que 3,5 km.km⁻², o que caracteriza a microbacia como excepcionalmente bem drenada, apresentando muitos cursos de cursos d'água, córregos e rios. O elevado índice leva a considerar a região como uma microbacia com solo de pouca permeabilidade e pouca cobertura vegetal. Considerando a realidade do local, a área possui uma elevada carência hídrica, mesmo constatando a presença de vários cursos d'água intermitentes na região.

- Tempo de concentração (T_c)

O tempo de concentração da bacia hidrográfica apresentou um valor de 7 horas e 32 minutos. Esse índice corresponde ao tempo que a partícula de água de chuva que cai no ponto mais afastado da bacia leva para, escoando superficialmente, chegar ao exutório. Sua relevância influencia no escoamento da bacia, sendo, dessa forma, uma grandeza essencial para avaliação hidrológica das bacias.

- **Nanobacia Hidrográfica Fundação Terra**

Para efeito de análise, a Tabela 13 apresenta os coeficientes obtidos de acordo com os parâmetros da nanobacia que contém os territórios da Fundação Terra (NBH1).

Tabela 13 – Características fisiográficas da Nanobacia Hidrográfica Fundação Terra.

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Área da nanobacia (km ²)	12,02
Perímetro da nanobacia (km)	19,50
Coeficiente de compacidade (K_c)	1,57
Índice de circularidade (I_c)	0,40
Fator de Forma (K_f)	0,03
Densidade de drenagem (km.km ⁻²)	5,14
Tempo de concentração (horas)	2,12

Fonte: Os Autores (2017)

Os parâmetros planimétricos apresentados se assemelharam às características adquiridas no item anterior, referentes à microbacia. De acordo com os dados da tabela apresentada, a nanobacia hidrográfica possuiu uma área de 12,02 km², equivalente a aproximadamente 1200ha. Tendo em vista que as especificações do Projeto CBZ consistiu em delimitar nanobacias em, no mínimo 500ha, esta apresentada foi automaticamente desenvolvida com o limiar exigido, porém, não obteve um resultado próximo ao estabelecido, pois sua determinação é dada de acordo com o comportamento topográfico do terreno.

Analisando os coeficientes da tabela, a área mostrou-se pouco suscetível a enchentes, pelo fato do seu coeficiente de compacidade apresentar um valor acima de 1,50, e, devido ao seu fator de forma exibir um valor afastado da unidade, resultando 0,03. Há uma indicação de que a nanobacia não possui formato circular, possuindo, assim, uma tendência à forma alongada.

Este fato é comprovado pelo índice de circularidade, possuindo um valor de 0,40. Dando continuidade, a área apresenta-se como excepcionalmente bem drenada, caracterizada como pouco permeável, devido ao seu alto índice de densidade de drenagem, sendo 5,14. O tempo de concentração da nanobacia apresentou um valor de 2 horas e 7 minutos, influenciando no período de escoamento da água, sendo, então, uma grandeza essencial para a avaliação hidrológica das bacias.

10.6 Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo

A microbacia da Fundação Terra ocupa uma área afastada dos centros urbanos dos municípios de Sertânia, Buíque e Arcoverde – PE, podendo-se dizer que hoje a mesma está situada em zona rural, sendo composta basicamente por áreas de vegetação rasteira, vegetação arbórea, algumas unidades habitacionais isoladas, regiões de solo exposto, rede viária e muitos açudes.

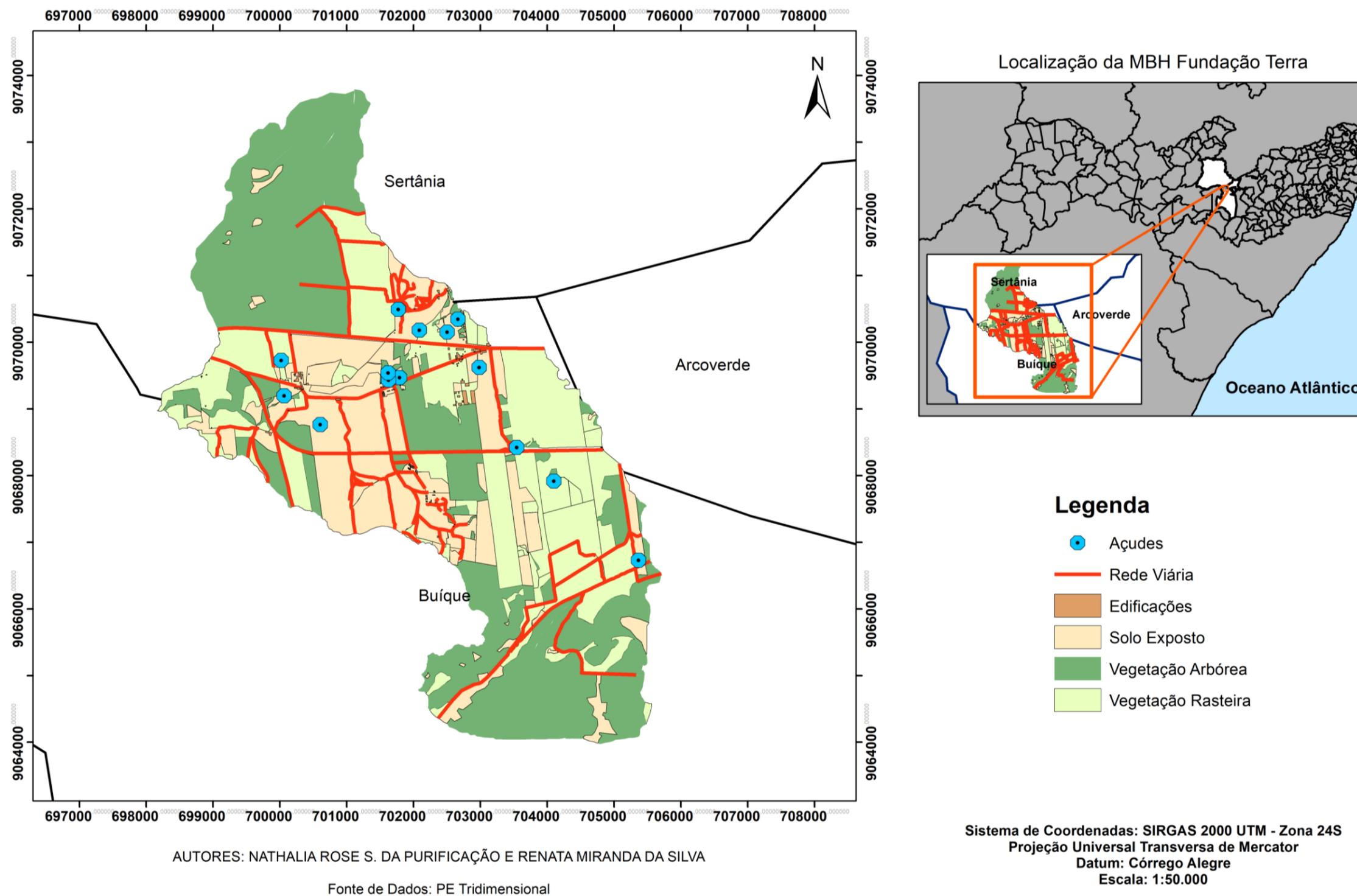
Nas áreas mais elevadas há uma predominância de vegetação arbórea e bastante densa, onde percebe-se pouca influência antrópica. Já na parte central da microbacia, que possui um relevo mais plano, há presença de algumas edificações residenciais e também das instalações da Fundação que tem grande influência com a população local. Nesta região, verifica-se a uma maior representatividade de solo exposto e vegetação rasteira característica do bioma caatinga.

Percebe-se ainda que a rede viária desta unidade territorial é bem distribuída nas áreas onde há propriedades rurais e que a mesma é cortada por uma importante rodovia, a BR-232. Através das ortofotos foram identificados um total de 13 açudes na microbacia, considerados como uma solução emergencial para a carência hídrica e os longos períodos de seca. A existência dos mesmos quando contextualizada aos problemas de abastecimento de abastecimento da região comprova a ineficiência dessas reservas superficiais que estão expostas à grande radiação solar.

Estas observações podem ser visualizadas na Figura 12, onde representa-se o mapa de uso e ocupação do solo da microbacia.

Figura 12 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Microbacia da Fundação Terra.

Mapa de Uso e Ocupação do Solo

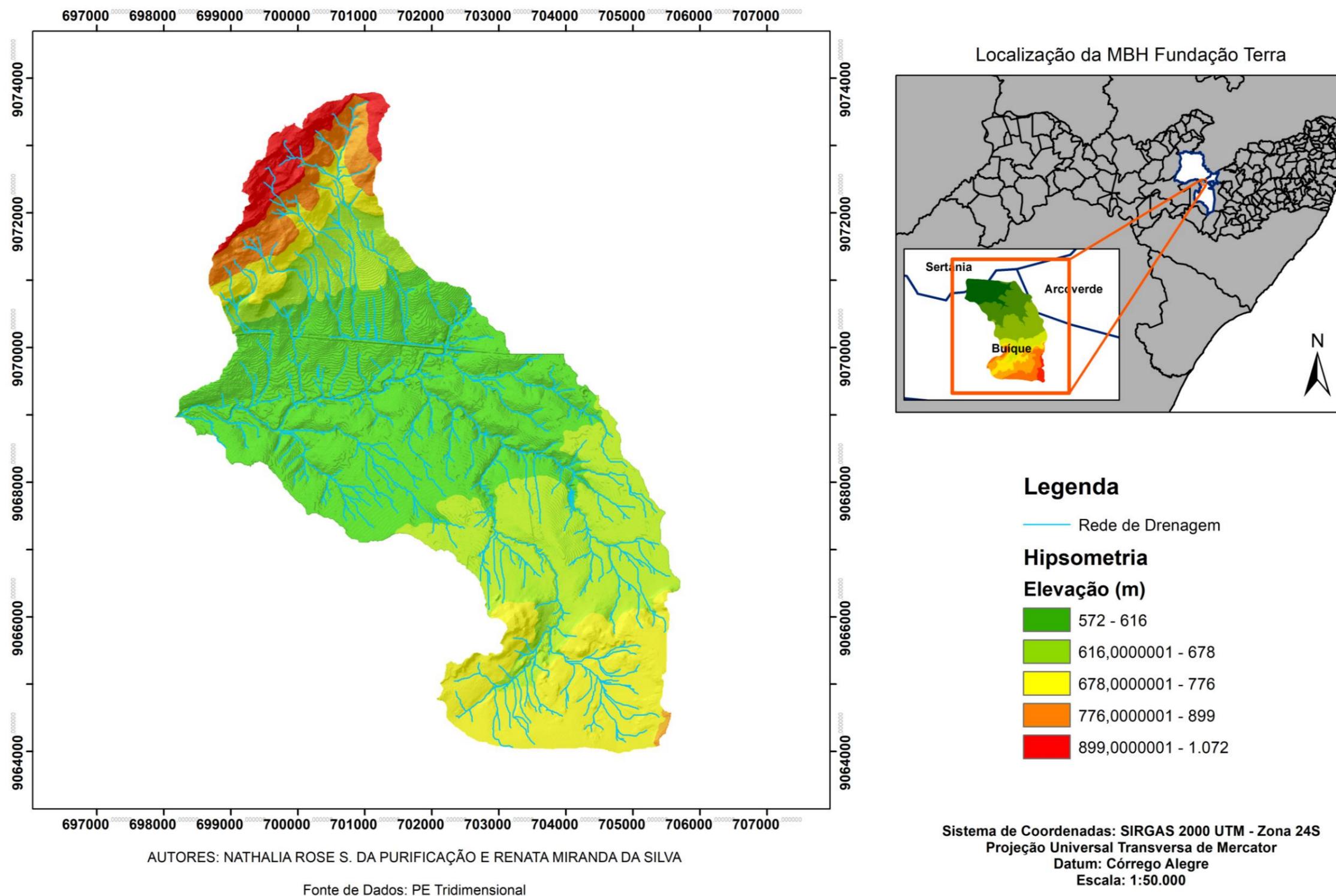


10.7 Produtos Cartográficos

Além do mapa de uso e ocupação do solo foram confeccionados mapas de declividade e hipsométrico da região da microbacia estudada com a finalidade de conhecer o relevo de forma mais aprofundada e facilitar a construção dos barramentos de pedra.

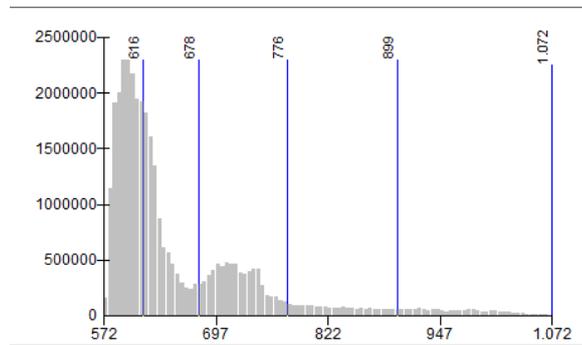
O mapa hipsométrico é derivado da reclassificação do modelo digital do terreno, permitindo a quantificação relativa da área ocupada por determinado intervalo de altitude. Como pode ser visualizado na Figura 13 a microbacia apresenta como cota altimétrica mais baixa o valor de 572 metros, correspondente à região onde está localizada a sua foz, e como cota mais elevada, o valor de 1072 metros, nas áreas que correspondem às nascentes dos rios que se iniciam em duas serras: a Serra dos Pereiros e a dos Pinheiros.

Figura 13 – Mapa Hipsométrico

Mapa Hipsométrico MBH Fundação Terra

Como interpretação complementar, através do histograma do mapa hipsométrico (Figura 14), pode-se constatar que a maior parte da área da bacia está situada entre as altitudes de 572 e 616 metros.

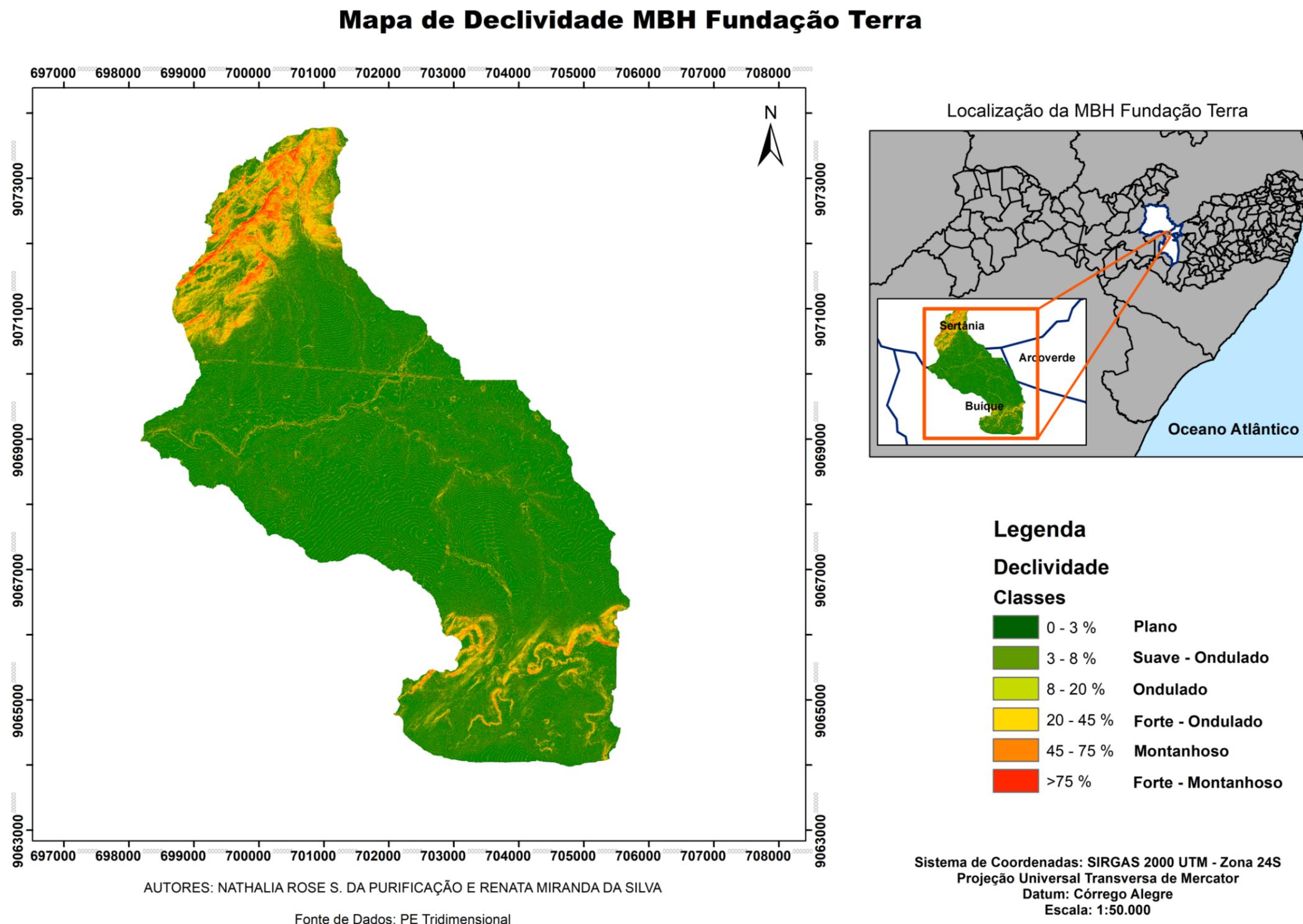
Figura 14 – Histograma de Frequência do Mapa Hipsométrico.



Fonte: Os Autores (2017)

O mapa de declividade (Figura 15) foi gerado com intervalos em percentual e mostram a inclinação da área com relação a um eixo horizontal. Observa-se que a região pode ser classificada, conforme as classes definidas pela EMBRAPA, majoritariamente como uma superfície plana, tendo em vista que maior parte dos dados foi reconhecida no intervalo de baixa declividade.

Figura 15– Mapa de Declividade



11. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Grande parte dos estudos acadêmicos que envolvem a delimitação automática de microbacias hidrográficas utiliza como fonte de dados principal o modelo de elevação disponibilizado pela missão SRTM. Com o desenvolvimento da tecnologia, novas técnicas de obtenção de informações sobre o terreno são descobertas, oferecendo um maior nível de precisão à representação e à geração de produtos cartográficos.

Com a produção do presente trabalho pode-se avaliar a interferência do uso de dados de diferentes resoluções espaciais e de diferentes fontes em processos de definição dos limites dos divisores d'água de micro e nanobacias, assim como nos procedimentos de extração de redes de drenagem utilizando técnicas de Geoprocessamento. Foi constatado tecnicamente que por ter uma melhor resolução espacial, os dados provenientes do Programa Pernambuco Tridimensional generalizam menos a informação altimétrica do terreno, o que torna possível a delimitação de uma quantidade de bacias superior às geradas pelos demais modelos.

Igualmente, a extração dos cursos d'água com base neste dado se mostrou mais satisfatória, apresentando uma rede de drenagem densa e com visualização dos cursos de menor ordem, o que pode ser muito útil para o gerenciamento de projetos de abastecimento. Para estudos que exijam um maior nível de precisão, recomenda-se que os métodos de delimitação automáticas de bacias não sejam realizados em modelos digitais obtidos a partir de estruturas vetoriais, pois os mesmos apresentaram muitas inconsistências nos limites das unidades territoriais devido à falta de informação altimétrica entre as curvas de nível.

Em relação à funcionalidade das ferramentas testadas, verificou-se que o SAGA não permite a introdução do parâmetro de número de células que formarão as micro ou nanobacias, formando unidades de áreas aleatórias. Já o GRASS permite a inclusão do limiar de processamento, porém, tem como desvantagem sua limitação quanto ao tamanho da matriz utilizada e quanto à resolução espacial do dado. Processos que demandem uma grande exigência computacional não são concluídos nesta ferramenta. O ArcHydro, por sua vez, possui algoritmos mais sofisticados que permitem que dados de diferentes extensões e tamanho de célula sejam executados sem maiores problemas. No entanto, a ferramenta possui muitas etapas para a delimitação de bacias, o que torna sua execução mais longa. Além disso, como trata-se de um *software* comercial, pode representar um custo impraticável para pequenas gestões.

Para este estudo foram apresentadas, de forma comparativa, três plataformas hidrológicas destacando suas vantagens e limitações. No entanto, para análises de mesma natureza, recomenda-se a utilização de novas extensões existentes, como por exemplo o TerraHidro, complemento do TerraView e o TauDEM, plataforma do QGIS, ambos gratuitos e livres.

A análise das características fisiográficas permitiu associar os resultados numéricos à realidade da região estudada. De maneira geral, as micro e nanobacias apresentam baixa susceptibilidade à enchentes, caracterizadas como pouco permeáveis, com tendência à forma alongada e excepcionalmente bem drenadas, apesar de grande de parte dos seus cursos d'água serem intermitentes.

A utilização dos dados do PE 3D possibilita, de forma geral, a criação de uma base de apoio às ações de gestão territorial em todo o estado de Pernambuco, devido ao seu grande diferencial em nível de detalhamento o que provoca um elevado ganho de qualidade na modelagem dos processos hidrológicos. Sabe-se que o uso do MDS da SRTM não é indicado para gerar produtos em grandes escalas, porém, com o MDT do PE 3D é possível trabalhar em escalas cadastrais formando dados cartográficos com alta precisão planialtimétrica.

Conclui-se que os produtos cartográficos confeccionados podem auxiliar o Conceito Base Zero a realizar um novo planejamento com relação aos recursos e necessidades da microbacia, e, comprovando a eficiência das informações produzidas, já foi realizada a execução de um barramento de pedra no território da Fundação Terra, solucionando parcialmente o problema de abastecimento da instituição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. R. C. Bacia Hidrográfica: Unidade de Planejamento Ambiental. In: **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.4, n.4. Universidade Federal do Amazonas, 2012.
- APARECIDO, C. F. F.; VANZELA, L. S.; VAZQUEZ, G. H.; LIMA, R. C. **Manejo em bacias hidrográficas e sua influência sobre os recursos hídricos**. Irriga, Botucatu, v.21, n.2. 2016.
- BALTSAVIAS, E. P.. Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. V .54, p. :199–214, 1999.
- BRUNO, L. O.; GRASS: A free and open source solution for hydrographic body analysis. Nativa. In: **Sinop**, v.5, n. 1, p.24-30, jan/fev. 2017. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/3761>>. Acesso em 20 set 2017.
- BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. In: **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 14, n.2, 2009.
- CARELLI, Liamara; LOPES, Priscila Paixão. Caracterização Fisiográfica da Bacia Olhos D'água em Feira de Santana/BA: Geoprocessamento Aplicado à Análise Ambiental. In: **Boletim Goiano de Geografia – BGG**. Goiânia, v. 31, n. 2, p. 43-54, jul./dez. 2011.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Hidrologia**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/it113-hidrologia.htm>>. Acesso em 12 de set. 2017.
- CHARLIER, F.; QUINTALE JUNIOR, C. O SIG como ferramenta para a gestão ambiental em uma ferrovia. In: **Engevista**, v. 6, n. 3, p. 25-35, 2004.
- CHOI, J.-Y.; B.A.; THELLER, L.; HARBOR, J. Utilizing web-based gis and sdss for hydrological land use change impact assessment. In: **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 48, n. 2, p. 815-822, 2005.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. In: **Geoscientific Model Development**, v. 8. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>>. Acesso em 20 ago 2017.
- CORREA, N.F.; RIBEIRO, V. O.; MIOTO, C. L. M.; FILHP, A. C. P.; Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. In: **Anuário do Instituto de Geociências -UFRJ**. Rio de Janeiro, 2017.

DEMÉTRIO, J.G.A.; DOHERTY, F.R.; ARAUJO FILHO, P.F. de; SCHEFFER, S. - Qualidade de Água Subterrânea no Nordeste Brasileiro. In: **Anais da 45ª Reunião Anual da SBPC**. Recife: UFPE/IPA/LAMEPE, 1993.

DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; FREITAS, C. C.; SANTOS, J. R.; ELMIRO, M. T.; Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética – Princípios e Aplicações. In: **Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens**. Minas Gerais, p. 4-13, 2003.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. ArcGIS® – Tutorials. Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>>. Acesso em 30 ago 2017.

GRANELL-PÉREZ, M. D. C. **Trabalhando geografia com as cartas topográficas**. Ijuí, RS: Unijuí, 2004.

GROHMANN, C.H. **Introdução à Análise Digital de Terreno com GRASS-GIS**. São Paulo: Instituto de Geociências da USP, 2008.

_____. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, D.F., 1o de setembro de 1997. Seção 1, p.470.

LIMA, G. A.; GENEROSO, C. M.; SANTOS, C. M.; SILVA, L. A.; SOUSA, R. G. Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento e gestão: Estudo de caso Ribeirão Isidoro. In: **Anais do VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Campina Grande, 2016.

LIMA, M. B.; MENDES, I. C. S.; OLIVEIRA, J. R. B.; SACRAMENTO, I. C. C.; Tecnologia laser scanner: potencialidades e características. In: **Anais do Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto – GEONORDESTE 2017**. Salvador, 2017.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2ª ed. ampliada. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.

MENDES, C.A.B.; CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

PADILHA, J. A.; ZANGHETIN, M. F. L.; ORTEGA, E. O uso da água nas micro-bacias hidrográficas do Semi-árido do Nordeste brasileiro e o conceito base zero. In: ORTEGA, E.; ULGIATI, S. (Orgs.). **Proceedings of IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia de Alimentos: UNICAMP, 2004.

PENHA, A. L. T.; SILVA, D. C. Correção de erro de altitude em MDS ASTER-GDEM em delimitação de bacia hidrográfica. In: **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife, 2012.

PESQUISA NACIONAL POR AMOSTRA DE DOMICÍLIOS (PNAD), 2009. Disponível em:<<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2009/default.shtm>>. Acesso em 20 set 2017.

- ROCHA, A.A. **A bacia hidrográfica como unidade de gestão de água.** II Semiluso – Seminário Luso-Brasileiro de Agricultura Familiar e Desertificação. 2008. Disponível em: <http://www.geociencias.ufpb.br/leppan/gepat/files/gepat022.pdf>. Acesso em 17 out 2017.
- SAGA GIS. <https://sagagisbrasil.wordpress.com/>. Acesso em agosto. 2017.
- SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. In: **Geological Society of America Bulletin**. n. 67, p. 597- 646, 1956.
- SETTI, A.A.; LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M. & PEREIRA, I.C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2ª edição. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; Agência Nacional de Águas – ANA, 2001.
- SILVA, C. A. **Manejo integrado em microbacias hidrográficas.** In: **Estudos Sociedade e Agricultura.** UFRRJ. p.182-188. 1994.
- SILVEIRA, A. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** – RBRH, v. 10, n.1, 2005.
- SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. In: **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.30, n.1, p.46-57, jan/fev, 2010.
- SUASSUNA, J. **A pequena e média açudagem no semi-árido nordestino: uso da água na produção de alimentos.** Recife: FUNDAJ – Instituto de Tropicologia, 1997. Disponível em: < http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&id=756&Itemid=376>. Acesso em 30 set 2017.
- TAYLER, K.; WALKER, G.; ABEL, D. A framework for model integration in spatial decision support systems. In: **International Journal of Geographical Information Science**, v. 13, n. 6, p. 533- 555, 1999.
- TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- VANACKER, V.; MOLINA, A.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DERCON, G.; DECKERS, S. River channel response to short-term humaninduced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. In: **Geomorphology**, v.72, p.340-353, 2005.
- XU, Z. X.; ITO, K.; SCHULTZ, G. A.; LI, J. Y. Integrated hydrologic modeling andGIS in water resources management. In: **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 15, n. 3, p. 217-223, 2001.

APÊNDICE

APÊNDICE 1: Mapa produzido pelas autoras através da vetorização manual das cartas da SUDENE desenvolvido na primeira fase do projeto Conceito Base Zero.

CONFLUÊNCIA DOS MUNICÍPIOS DE SERTÂNIA, BUIQUE E ARCOVERDE - PE.
ESCALA 1:50.000

