

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

**CARLOS ALEXANDRE GOMES COSTA**

**AVALIAÇÃO DOS DADOS SRTM ATRAVÉS DE ANÁLISE ALTIMÉTRICA E  
MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMI-ÁRIDO.**

**FORTALEZA**

**2008**

C871a Costa, Carlos Alexandre Gomes  
Avaliação dos dados SRTM através de análise altimétrica e morfométrica de bacias hidrográficas no semi-árido / Carlos Alexandre Gomes Costa, 2008. 120 f. ;il. color. enc.

Orientador: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira  
Área de concentração: Irrigação e Drenagem  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2008.

1. Modelo digital de elevação 2. Caracterização fisiográfica 3. ArcHydro  
4. Bacia do Jaguaribe I . Teixeira, Adunias dos Santos (orient.) II.  
Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola

CDD 630

CARLOS ALEXANDRE GOMES COSTA

AVALIAÇÃO DOS DADOS SRTM ATRAVÉS DE ANÁLISE ALTIMÉTRICA E  
MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMI-ÁRIDO

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

FORTALEZA

2008

CARLOS ALEXANDRE GOMES COSTA

AVALIAÇÃO DOS DADOS SRTM ATRAVÉS DE ANÁLISE ALTIMÉTRICA E  
MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMI-ÁRIDO

Dissertação submetida à Coordenação do  
Curso de Pós-graduação em Agronomia da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial para obtenção do grau de Mestre em  
Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 28/ 03/ 2008

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador), Ph. D.  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof<sup>ª</sup>. Eunice Maia de Andrade (Conselheira), Ph. D.  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro (Conselheiro), Ph. D.  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Antônio Macílio Pereira de Lucena (Conselheiro), Dr.  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

À minha filha, minha esposa,  
meus pais, meus irmãos, meus avós, e  
àqueles que também colaboraram e  
acreditaram na realização deste projeto de  
vida.

“A água é o sangue, insubstituível. Nada é mais suave. E, no entanto, nada a ela resiste. Aquele que conhece seus princípios pode agir corretamente tornando-a como chave e exemplo. Quando a água é pura, o coração do povo é forte. Quando a água é suficiente, o coração do povo é tranqüilo.”

*Filósofo chinês desconhecido do século IV A.C.*

## AGRADECIMENTOS

Aos cidadãos e cidadãs cujos pensamentos sinceros, de amizade, paz e fraternidade, tomam o mundo como seu lar e transformam a vida ainda melhor.

Aos meus pais, Antônio de Pádua e Sônia Maria, que incentivaram o meu projeto de vida, suportaram todo o sofrimento da minha árdua batalha e compartilharam verdadeiramente, e com entusiasmo os muitos momentos felizes.

À minha filha, Fernanda Laís, simplesmente por existir.

À minha esposa, Giulliana, e sua família por suas colaborações durante o curso.

Aos meus padrinhos, madrinhas, compadres, comadres, afilhados, afilhadas, tios, tias, primos e primas.

Aos meus irmãos: André Victor e Pádua Jr (os caras) e Alessandra pela força e colaboração nesta empreitada.

Aos amigos Kleber e Evandro, e às suas famílias que se integraram fielmente aos objetivos propostos.

À Dona Zuleica, Sr. Agostinho e família pelo carinho e apoio incondicional.

À Universidade Federal do Ceará que possibilita a formação de bons cidadãos e cidadãs. A todos os professores e professoras que exercem a profissão com prazer e dedicação. Em especial, aos amigos professores do Departamento de Engenharia Agrícola: Claudivan Lacerda, Nonato Costa, José Carlos de Araújo, Renildo Mion, Francisco de Souza (Titico), Marcus Bezerra, Camboim, Moreira e Omar; Fitotecnia: Sebastião Medeiros, Renato Innecco, Pitombeira, Niedja e Márcio Kleber; Solos: Assis Junior, Fernandez Herreira, Thiago e Teógenes; Bioquímica: Marcio Ramos; e Estatística: Néelson (*in memorian*), Silvia e Róbson.

À Embrapa Agroindústria Tropical e a todos os companheiros de lá que sempre me deram apoio e pelo qual tenho ótimos laços de amizade. Aos pesquisadores que tive a oportunidade de interagir e contribuir com as pesquisas que são tão necessários para o desenvolvimento da agricultura. Em especial para Morsyleide, Cléa, Lúcia de Fátima da equipe de gestão ambiental e Rubens Sonsol, Afrânio e Fábio da área de solos e água, que foram determinantes no meu desenvolvimento profissional. Além de Vitor Hugo, Andréia Hoster, Marto Viana, Apoliano, Freire, Emilson, Fred, Marlos e Mosca.

Agradeço principalmente aos professores Adunias dos Santos Teixeira e Eunice Maia de Andrade pela dedicada orientação. E aos professores Marco Aurélio (DEHA) e Macílio Pereira de Lucena (INPE) por suas oportunas e valiosas contribuições neste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa pela interação com o professor Antônio Alves e o doutorando Alípio Leão.

Ao Projeto FINEP/ CNPQ, Fundo Setorial de Recursos Hídricos e ao CNPq

Aos colegas e aos amigos pelos quais sinto a existência de uma consideração recíproca, especialmente: Guislain, Léa Bessa, Alex, Ana Iraidy, Édson, Flávio, Márcio Dantas, Almiro, Salmito, Lígia e Daniel, Fábio Diniz, Haynna, Neyara, Franzé, Fred, Fábio Costa, Isabel, Natanael, Fabrícia, Nílvia, Giovana, Geocleber, Jaime, Juliana, David, Danielle, Renata, Cynthia, Heliel, Tomil, Cleílson, Mário Sérgio, Davidson, Marcio Borges e Aurélio.

Especialmente aos colegas e amigos de mestrado e doutorado do Departamento de Engenharia Agrícola: Aninha, Maurício, Ivan, Toinha, Fátima, Willa, Dimas, Edvan José, Beatriz, Camila, Clênio, Anderson, Nilvia Nara, Eveline Salgado, Ana Paula, Regina Régia, Clemilson, Firmino, Joseilson, Ana Célia, Deodato Aquino, Fernando Lopes, Jefferson Nobre, Leila Neves, Abelardo, Danielle, Clemilda, Denise, Flávio, Lúcio, Dirceu, Jorgiana, Vidal, Sávio, Adriana, Alexandre Cunha, Marcos Meireles, Yuri, Mário, Pedro Medeiros, George Mamede, Tereza Raquel, Wanda, Débora Mythia, Helba Araújo, Eduardo Jr., Felipe Muniz, Andréia, Bruna, Fabilla, Rodrigo Gregório, Lobato, Amauri, e Mauro Régis.

Observa-se, pela extensa lista de agradecimentos, a significativa dívida de gratidão, assumida durante estes anos. Isto se deve a aceitação da participação destas pessoas na construção de minha vida. Considero importante o reconhecimento aos amigos pelo qual tenho considerável estima.

Especialmente a Deus, pela concessão de saúde, paz, alegrias, tristezas, vida, felicidade, amor, realizações, aprendizado e experiência. E a toda irmandade celestial que certamente vigia nossos atos e avalia nossas atitudes.



## RESUMO

COSTA, Carlos Alexandre Gomes, Universidade Federal do Ceará. Março de 2008. **Avaliação dos dados SRTM através de análise altimétrica e morfométrica de bacias hidrográficas no Semi-Árido.** Orientador: Adunias dos Santos Teixeira. Conselheiros: Eunice Maia de Andrade, Marco Aurélio Holanda de Castro, Antônio Macílio Pereira de Lucena.

Em tempos de mudanças globais torna-se necessário cada vez mais entender a dinâmica hidrológica e ambiental. Caracterizá-las em um menor tempo possível, com maior confiabilidade é a exigência imperativa que pesa sobre a ciência. A topografia evidencia-se como um fator imprescindível no entendimento destes processos. Sua determinação é onerosa, tanto economicamente quanto temporalmente, tendo ainda que considerar a dinâmica das transformações ambientais que alteram continuamente essa topografia.. Em 2000 através da missão topográfica por RADAR interferométrico (SRTM), liderada pela NASA com a colaboração das agências espaciais alemã (DRL) e italiana (ASI) foi gerado um Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizando a interferometria de RADAR. Esses dados são disponíveis gratuitamente e estão sendo usados em grande escala no meio científico. Entretanto, por ser um produto interferometria de RADAR, retrata a superfície da terra, sofrendo inclusive a influência da vegetação, o que pode inviabilizar o uso desse MDE em trabalhos que exijam maior nível de detalhamento e precisão.. Assim, o objetivo deste trabalho foi validar os dados SRTM para as condições do semi-árido brasileiro e a partir destes dados estimar com maior consistência a caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas afluentes do rio Jaguaribe. A metodologia utilizada na validação dos dados SRTM consiste em comparações e análise estatística com dados obtidos no campo com GPS diferencial (DGPS) e outras bases de dados referenciais existentes, cartas planialtimétricas DSG/ SUDENE e dados de RN do IBGE para a Bacia do Jaguaribe situada no semi-árido cearense. Os resultados apresentam um erro altimétrico de aproximadamente 7 m com relação aos RNs da bacia. Com uso do DGPS em um relevo plano com baixíssima declividade e com vegetação de porte baixo os resultados apontam um erro altimétrico de aproximadamente 1,7 m. A cobertura vegetal influenciou na variação dos dados SRTM para a vegetação com maior altura média. Para a caracterização fisiográfica deve-se utilizar valores de área de delimitação (*threshold*) que não ultrapassem 50 pixels contribuintes do SRTM (90 m) necessários para geração da rede de drenagem e de um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) para a área de estudo. Para áreas com relevo plano os valores de “*threshold*” devem ser revistos. A elaboração de um material de consulta referencial e atualizado com a caracterização fisiográfica envolvendo o uso do Sistema de Informações Geográficas e Modelo Digital de Elevação torna-se fundamental à medida que aumentam as possibilidades de geração de produtos advindos do sensoriamento remoto e geoprocessamento. O uso da extensão ArcHydro facilita a caracterização fisiográfica e permite o armazenamento e utilização destes dados como Sistema de Informações Geográficas.

**Palavras-chave:** Caracterização fisiográfica, ArcHydro, Bacia do Jaguaribe, Modelo Digital de Elevação.

## ABSTRACT

COSTA, Carlos Alexandre Gomes, Federal University of Ceará. March 2008. **Assessment of SRTM data by altimetric and morphometric analysis of watersheds in a semi-arid environment**. Supervisor: Adunias dos Santos Teixeira. Counselor: Eunice Maia de Andrade, Marco Aurélio Holanda de Castro, Antônio Macílio Pereira de Lucena.

Face to global climate change it is necessary a better understanding of the hydrological and environmental dynamics. To characterize them in a short time with reliability is an important requirement for the science. Topography is a major factor to understand these factors. Its determination is onerous, both economically and temporally, and the dynamics of environmental transformations that alters its pattern must be considered. In the year 2000, through a interferometric RADAR topographic mission (SRTM) led by NASA in cooperation with the German (DRL) and the Italian (ASI) space agencies, a Digital Elevation Model was generated by the employment of RADAR interferometry. These data are available costless and have been greatly used by scientists. Nonetheless, since it is a RADAR interferometer product, it represents the Earth surface and is subjected to the influence of vegetation, what may make this DEM unreliable in works that require a high detail level and good precision. Therefore, the objective of this research is to validate SRTM data to the Brazilian semi-arid conditions and, based on these data, characterize the physiograph of watersheds in the Jaguaribe basin. The methodology used in the SRTM data validation consists in a comparison and statistical analysis of field data obtained with a differential GPS (DGPS) and other data bases such as the DSG/SUDENE maps and level reference points from IBGE in the Jaguaribe basin located in Ceará State. Results present an elevation error of approximately 7 m in relation to the level reference points in the basin. For the use of DGPS on a plan relief with very low slopes and vegetation with low heights, results show an elevation error of approximately 1.7 m. Vegetation cover influenced the variation in SRTM data to vegetation with higher mean height. To the physiographic characterization, values not larger than 50 pixels must be adopted as the contributing area of SRTM (90m), used in the generation of the river network and the Hydrological Consistent Digital Elevation Model (HCDEM) in the study area. To areas with low slopes, the threshold value must be reviewed. The development of a reference bibliography with physiographic characterization associated to the use of a Geographic Information System (GIS) and a DEM is fundamental as it enhances the possibilities of generating products from remote sensing and geo-processing techniques. The use of ArcHydro extension facilitates a physiographic characterization and allows the storage and use of these data as a GIS.

**Keywords:** physiographic characterization, ArcHydro, Jaguaribe basin, Digital Elevation Model

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Ilustração do ônibus espacial Endeavour na aquisição dos dados SRTM (adaptado de Rabus et al., 2003).....	24
FIGURA 2 - Detalhes do RADAR Interferométrico (adaptado de Rabus et al., 2003). .....	25
FIGURA 3 - Espectro eletromagnético e bandas espectrais (DUTRA et al., 2003).....	28
FIGURA 4 - Contribuições no retroespalhamento (DUTRA et al., 2003).....	29
FIGURA 5 - Retroespalhamento nas bandas C e X (NOERNBERG, 1996). .....	30
FIGURA 6 - Mapa do Ceará com ênfase à localização da área de estudo. ....	41
FIGURA 7 - Mapa da vegetação para a Bacia do Jaguaribe e RNs do IBGE.....	44
FIGURA 8 - Rede de Referência de Nível para o Brasil (IBGE, 2007).....	46
FIGURA 9 - Rede de Referência de Nível para o estado do Ceará (IBGE, 2007).....	46
FIGURA 10 - Imagem Landsat 5 dos pivôs na Chapada do Apodi e pontos com DGPS.....	48
FIGURA 11 - Mapa do Ceará com ênfase à Bacia do rio Jaguaribe e localização da área de estudo. ....	54
FIGURA 12 - Fluxograma para geração de um MDEHC .....	55
FIGURA 13 - Remoção de depressões espúrias do MDE da área de estudo. ....	56
FIGURA 14 - Ilustração do processo de remoção das depressões espúrias do MDE. ....	57
FIGURA 15 - Desenho esquemático da direção de fluxo dos pixels vizinhos com ênfase ao exultório (Exu) da grade.....	58
FIGURA 16 - Ilustração do processo de obtenção do fluxo acumulado (flow accumulation), onde os números representam a quantidade de células contribuintes.....	59
FIGURA 17 - Desenho esquemático do fluxo acumulado ( <i>flow accumulation</i> ). ....	59
FIGURA 18 - Comparação entre os erros médios em decorrência da altura da vegetação através do teste de Tukey (95% de probabilidade). ....	67
FIGURA 19 - Comparação entre os erros médios em decorrência da classe de vegetação através do teste de Tukey (95% de probabilidade). ....	68
FIGURA 20 - Relação entre dados do SRTM e altitudes obtidas nos RNs para a Bacia do Jaguaribe. ....	69
FIGURA 21 - Curva do erro dos dados SRTM em função dos dados das RNs do IBGE.....	70
FIGURA 22 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 3 m de altura.....	72
FIGURA 23 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para as classes de vegetação com altura média de 3 m (a – caatinga arbustiva aberta; b – carrasco). ....	72

FIGURA 24 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 4 m de altura.....	73
FIGURA 25 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para as classes de vegetação com altura média de 4 m.....	74
FIGURA 26 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 5 m de altura.....	75
FIGURA 27 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 6 m de altura.....	76
FIGURA 28 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para as classes de vegetação com altura média de 6 m.....	77
FIGURA 29 - Frequência dos erros dos dados SRTM e enquadramento no PEC para a vegetação com altura igual a 4 m.....	80
FIGURA 30 - Curva do erro dos dados SRTM em função dos dados das RNs do IBGE.....	82
FIGURA 31 - Variação SRTM – DGPS na Chapada do Apodi.....	83
FIGURA 32 - Mapa da drenagem da meso-bacia do açude Nova Floresta. a) drenagem das cartas DSG/ SUDENE, b), c), d), e) e f) delimitação a partir de dados SRTM/ ArcHydro com <i>threshold</i> de 25, 50, 75, 100 e 125 células, respectivamente. ....	85
FIGURA 33 - Mapa da drenagem da meso-bacia do Joaquim Távora. a) drenagem das cartas DSG/ SUDENE, b), c), d), e) e f) delimitação a partir de dados SRTM/ ArcHydro com <i>threshold</i> de 25, 50, 75, 100 e 125 células, respectivamente. ....	86
FIGURA 34 - Mapa da drenagem da meso-bacia do Jenipapeiro. a) drenagem das cartas DSG/ SUDENE, b), c), d), e) e f) delimitação a partir de dados SRTM/ ArcHydro com <i>threshold</i> de 25, 50, 75, 100 e 125 células, respectivamente. ....	87
FIGURA 35 - Perfil longitudinal do curso principal da meso-bacia Nova Floresta.....	90
FIGURA 36 - Perfil longitudinal do curso principal da meso-bacia Joaquim Távora .....	90
FIGURA 37 - Perfil longitudinal do curso principal da meso-bacia Jenipapeiro.....	91
FIGURA 38 - Mapa do relevo da meso-bacia do açude Jenipapeiro .....	93
FIGURA 39 - Mapa do relevo da meso-bacia do açude Joaquim Távora.....	94
FIGURA 40 - Mapa do relevo da meso-bacia do açude Nova Floresta .....	95
FIGURA 41 - Mapa hipsométrico da meso-bacia do Nova Floresta. Em a) delimitação a partir das cartas DSG/ SUDENE e em b) delimitação e curvas de nível automáticas a partir de dados SRTM/ ArcHydro.....	96

FIGURA 42 - Mapa hipsométrico da meso-bacia do Joaquim Távora. Em a) delimitação a partir das cartas DSG/ SUDENE e em b) delimitação e curvas de nível automáticas a partir de dados SRTM/ ArcHydro. ....	97
FIGURA 43 - Mapa hipsométrico da meso-bacia do Jenipapeiro. Em a) delimitação a partir das cartas DSG/ SUDENE e em b) delimitação e curvas de nível automáticas a partir de dados SRTM/ ArcHydro.....	97
FIGURA 44 - MDEHC para a meso-bacia do açude Floresta.....	99
FIGURA 45 - MDEHC para a meso-bacia do açude Joaquim Távora.....	100
FIGURA 46 - MDEHC para a meso-bacia do açude Jenipapeiro .....	101

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Designações das bandas de RADAR com ênfase nas bandas C e X da SRTM.....	28
TABELA 2 – Tamanho de escalas de bacias hidrográficas rurais com suas respectivas áreas (SOULSBY et al., 2004).....	35
TABELA 3 – Altura média das classes de vegetação que ocorrem na Bacia do Jaguaribe segundo Toniolo e Dantas (1994). ....	45
TABELA 4 – Padrão de exatidão cartográfico (PEC) (BRASIL, 1984) e valores de tolerância vertical e erro médio quadrático (EMQ) do PEC na escala de 1:100.000.....	51
TABELA 5 – Descrição das cartas DSG/SUDENE utilizadas na validação do MDEHC.....	53
TABELA 6 – Enquadramento do relevo a partir das características topográficas (EMBRAPA, 1999).....	61
TABELA 7 – ANOVA dos erros observados por influência da altura da vegetação .....	66
TABELA 8 – ANOVA dos erros observados por influência da vegetação .....	67
TABELA 9 – Análise da confiança dos dados SRTM em função da interferência da vegetação presente na Bacia do Jaguaribe .....	78
TABELA 10 – Análise do erro médio quadrado dos pontos do IBGE e SRTM para a bacia do Jaguaribe em função das alturas médias (m) .....	79
TABELA 11 – Análise do erro médio quadrado dos pontos do IBGE e SRTM para a bacia do Jaguaribe em função das classes de vegetação.....	81
TABELA 12 – Análise do erro médio quadrado dos pontos de DGPS e SRTM.....	83
TABELA 13 – Variação média percentual da fisiografia (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para as três bacias estudadas .....	88
TABELA 14 – Variação percentual dos mapas hipsográficos.....	98
TABELA 15 – Variação fisiográfica (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para a meso-bacia Nova Floresta com cinco valores de acumulação.....	114
TABELA 16 – Variação fisiográfica (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para a meso-bacia Joaquim Távora com cinco valores de acumulação.....	115
TABELA 17 – Variação fisiográfica (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para a meso-bacia Jenipapeiro com cinco valores de acumulação.....	116
TABELA 18 – Variação média da caracterização fisiográfica (SRTM/ ArcHydro - DSG/ SUDENE) para as três meso-bacias.....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAGP – Ajustamento Altimétrico Global Preliminar  
ANOVA – Análise de Variância  
*ARCHYDRO – ArcGIS Hydro model*  
*ASCII – American Standard for Code Information Interchange*  
*ASI – Agenzia Spaziale Italiana*  
BDG – Banco de Dados Geodésicos  
CIC – Centro de Informações Cartográficas  
*CRWR – Center for Research in Water Resources*  
DIJA – Distrito de Irrigação Jaguaribe Apodi  
DMS – Diferença Mínima Significativa  
*DRL – Deutsche Zentrum für Luft*  
DSG – Diretoria do Serviço Geográfico do Exército  
EMQ – Erro Médio Quadrático  
FAPIJA – Federação das Associações do Perímetro Irrigado Jaguaribe Apodi  
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos  
GPS – Sistema de Posicionamento Global  
*DGPS – Differential Global Position System*  
*HMS – Hydrologic Modeling Systems*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IGG – Instituto Geográfico e Geológico  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
InSAR – SAR Interferométrico  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
MDEHC – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente  
*NASA – National Aeronautics and Space Administration*  
*NIMA – National Imagery and Mapping Agency*  
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica  
RAAP – Rede Altimétrica de Alta Precisão  
*RADAR – Radio Detecting and Ranging*  
RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo  
RN – Referências de Nível  
*SAD/ 69 – South American Datum/ 1969*

SAR – RADAR de Abertura Sintética

SEPLAN – Secretaria de Estado do Planejamento e Desenvolvimento

SGB – Sistema Geodésico Brasileiro

SGE – Serviço Geográfico do Exército Brasileiro

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SISVAR – Sistema de Análise de Variância para Dados Balanceados

SLAR – RADAR de Visada Lateral

SNi – Seção de Nivelamento

*SRTM – Shuttle RADAR Topography Mission*

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

*USACE – U.S. Army Corps of Engineers*

*USDD – United States Department of Defense*

*USGS – United States Geological Survey*

*UTM – Universal Transverse Mercator*

*WGS84 – World Geodetic System 1984*



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Geoprocessamento e recursos hídricos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelo Digital de Elevação .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Missão topográfica por RADAR Interferométrico - SRTM.....</b>	<b>23</b>
2.4.1	Sistema de sensores ativos e RADAR interferométrico .....	26
2.4.2	Retroespalhamento e influência da vegetação .....	28
<b>2.5</b>	<b>Vegetação.....</b>	<b>30</b>
<b>2.6</b>	<b>Rede Altimétrica do IBGE.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7</b>	<b>GPS Diferencial .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8</b>	<b>Cartas planialtimétricas para o estado do Ceará .....</b>	<b>34</b>
<b>2.9</b>	<b>Bacias hidrográficas .....</b>	<b>35</b>
<b>2.10</b>	<b>Características morfométricas .....</b>	<b>35</b>
<b>2.11</b>	<b>Archydro como ferramenta de geração de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC).....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização da área de estudo .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Acesso e conversão dos dados SRTM .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>Mapa de vegetação .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4</b>	<b>Obtenção da base de dados altimétricos.....</b>	<b>45</b>
3.4.1	Acesso e conversão das Referências de Nível (RNs) do IBGE.....	45
3.4.2	Dados de DGPS .....	47
<b>3.5</b>	<b>Validação altimétrica dos dados SRTM.....</b>	<b>50</b>
3.5.1	Avaliação do efeito da vegetação na precisão da SRTM .....	50
3.5.2	Comparação dos dados DGPS com os dados SRTM .....	50
3.5.3	Avaliação da precisão dos dados SRTM .....	50
<b>3.6</b>	<b>Geração de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente.....</b>	<b>53</b>
3.6.1	Delimitação automática de bacias ( <i>Archydro Terrain Preprocessing</i> ) .....	56
3.6.2	Validação dos dados SRTM a partir do algoritmo Archydro .....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1</b>	<b>Validação dos dados SRTM.....</b>	<b>66</b>

4.1.1	Análise do erro dos dados SRTM.....	68
4.1.2	Variação dos dados SRTM x interferência da vegetação .....	71
4.1.3	Comparação dos dados SRTM com dados DGPS em relevo plano .....	82
<b>4.2</b>	<b>Dados SRTM/ ArcHydro .....</b>	<b>84</b>
4.2.1	Análise das características fisiográficas geradas através dos dados SRTM .....	84
4.2.2	Hipsometria gerada pelos dados SRTM .....	96
4.2.3	Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente .....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>118</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Em tempos de mudanças globais torna-se necessário cada vez mais entender a dinâmica hidrológica e ambiental. Caracterizar essa dinâmica em um menor tempo possível, com maior confiabilidade é a exigência imperativa que desafia a ciência.

Uma visão holística e globalizada das questões ambientais tem influenciado na geração de informações georreferenciadas, obtidas em ritmo cada vez mais intenso graças ao desenvolvimento de técnicas apoiadas no uso de computadores e à tecnologia espacial.

A associação do delineamento e da caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas e da rede de drenagem associada é uma etapa imprescindível em análises hidrológicas, de modo que o gerenciamento integrado dos recursos hídricos depende da disponibilidade de dados adequados para a construção e validação de modelos representativos dos processos hidrológicos.

A topografia evidencia-se como um fator imprescindível no entendimento destes processos. Sua determinação é onerosa, tanto economicamente quanto temporalmente, tendo ainda que se considerar a dinâmica das transformações ambientais que alteram continuamente essa topografia. Uma solução prática seria a representação das altitudes da terra através de programa espacial que visasse essa determinação.

Isso aconteceu em fevereiro de 2000 com a missão topográfica por RADAR interferométrico (Shuttle RADAR Topography Mission - SRTM) que gerou uma malha digital de altitudes de quase todo o globo terrestre, possibilitando cálculos computacionais entre outros com dados disponibilizados gratuitamente. As vantagens da automação são a maior eficiência e confiabilidade dos processos, a reprodução dos resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais. Porém, há a necessidade de validação destes devido a influência da vegetação no retorno do sinal do RADAR Interferométrico, podendo haver maiores ou menores erros de altitude, dependendo do tipo de cobertura vegetal.

Dentro do domínio de aplicações de dados de sensoriamento remoto, verifica-se uma grande falta de informações sobre vegetação, principalmente para a formação da Caatinga: a extensão e o pouco conhecimento existente bastariam para determinar esta região como um dos mais promissores campos de aplicação das tecnologias de sensoriamento remoto, para prover informações sobre os seus recursos. Tal contexto indica necessariamente uma ampliação da utilização das ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para estes fins (KAZMIERCZAK, 1996).

Neste sentido, a utilização de bases topográficas obtidas por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a necessidade de intervenções manuais na modelagem do relevo e, portanto, a resolução de aproximadamente 90 m dos dados da missão de mapeamento topográfico SRTM, representa um avanço importante em relação às alternativas até então disponíveis (VALERIANO, 2004).

De acordo com ESRI (1997), modelar digitalmente uma superfície, de modo consistente, significa representar o relevo de forma a reproduzir, com exatidão, o caminho preferencial do escoamento da água superficial observado na Terra. A utilização de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes (MDEHC) propicia o uso de sistemas de informações geográficas para obtenção automática das características físicas das bacias de drenagem.

A caracterização do meio físico da bacia hidrográfica, com o intuito de levantar todas as áreas críticas do ponto de vista da manutenção da água, é condição básica para um planejamento bem sucedido da conservação e produção de água. Essa conservação da água não pode ser conseguida independentemente da conservação dos outros recursos naturais.

A determinação de parâmetros visando à caracterização dos recursos hídricos nas bacias do Ceará esbarra em entraves, tais como, a escassez de informações básicas e a dimensão da área territorial que prescinde de um método eficiente para a geração de tal informação. Nos últimos anos, as técnicas de geoprocessamento e de sistemas de informação geográfica têm se desenvolvido, com aplicações notadamente nas áreas de recursos hídricos e ambientais. A geração de modelos para a determinação de parâmetros fisiográficos da bacia a partir de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes e incorporados a um banco de dados georreferenciado tem destaque com Olivera (2001), Mendes; Cirilo (2001), dentre outros.

Há uma estreita dependência das variáveis morfométricas em relação à exatidão relativa do modelo digital de elevação (MDE) (VALERIANO, 2004). As mudanças no relevo em decorrência das modificações em nível da paisagem podem afetar de maneira significativa os modelos hidrológicos. No Brasil, a maioria dos estudos hidrológicos segue as informações topográficas existentes nas cartas planialtimétricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Entretanto, editadas em 1977, essas cartas não representam a paisagem atual. A recente coleta de dados topográficos por técnicas de sensoriamento remoto, como os dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), tem se mostrado como alternativa de grande interesse para suprir a carência de informações relativas ao relevo. É primordial a atualização dessas informações. Essa defasagem, bem característica da rede hidrográfica

brasileira, pode ser suprida a partir do uso de técnicas de sensoriamento remoto e uso do sistema de informações geográficas (SIG).

O surgimento dos sistemas de informações sobre recursos hídricos no mundo ocorreu por força da necessidade de dinamizar o processo de gestão. Dois termos de uma equação a ser resolvida surgiram: a crescente complexidade da administração dos múltiplos usos da água por um lado forçando a melhoria da dinâmica gerencial, e por outro lado a oferta de serviços gerada pelo desenvolvimento tecnológico: SIG, sensoriamento remoto, telemetria, desenvolvimento de modelos matemáticos computacionais com melhor representação dos sistemas físicos, dentre outros. A junção destes termos leva aos sistemas de informações sobre recursos hídricos (MENDES; CIRILO, 2001).

Neste contexto, este trabalho apresenta uma perspectiva de estudo de caso dos dados de elevação do terreno com melhor representação da realidade a partir de dados de RADAR interferométrico para geração de um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), e melhor exatidão na extração de variáveis físicas das bacias hidrográficas. Assim, o objetivo deste trabalho é validar os dados SRTM para as condições do semi-árido brasileiro e a partir destes dados efetuar com maior consistência a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas afluentes do rio Jaguaribe.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Introdução**

Para que o planejamento e administração dos recursos hídricos possam ser exercidos de forma racional e dinâmica é importante a existência de informações sistematizadas e, sobretudo, de sistemas que articulem essas informações (MENDES; CIRILO, 2001).

A partir dessa exigência, visão globalizada das questões ambientais, cresce consideravelmente a demanda por informações cartográficas, as quais são obtidas em ritmo cada vez mais intenso graças ao desenvolvimento de técnicas apoiadas no uso de computadores e nas imagens obtidas por satélites espaciais (MARQUES; SILVA, 2007).

Uma das técnicas mais utilizadas na representação cartográfica é a criação de uma matriz de altitudes. Essa estrutura denominada de MDE é a mais adequada para representar dados topográficos. A precisão dos mesmos está associada às características dos dados fontes e do interpolador utilizado, entre outras. Várias técnicas têm sido utilizadas com a finalidade de se obterem modelos numéricos de terrenos cada vez mais precisos, ou seja, tão representativos quanto possíveis do espaço geográfico (também chamado de “mundo real”) (DIAS et al., 2004).

Cada técnica de obtenção tem seu nível de qualidade e precisão, sendo que cada produto é desenvolvido para atender determinadas aplicações que variam em função da escala de trabalho desejada. Os modelos obtidos por sensoriamento remoto têm-se destacado pela facilidade, padronização, rapidez, qualidade e disponibilidade de dados topográficos para diversas regiões (de difícil e fácil acesso).

### **2.2 Geoprocessamento e recursos hídricos**

O geoprocessamento vem sendo usado por vários setores que tratam da questão hidrológica e ambiental como importante ferramenta de planejamento, pois a avaliação integrada de um grande número de variáveis se torna possível e simplificada com o uso deste sistema; permite a rápida geração de informações intermediárias e finais, além da inclusão de variáveis anteriormente não pensadas, visto que possibilita novas interações a qualquer momento (DONHA et al., 2006).

O geoprocessamento e suas aplicações como os sistemas de informações geográficos (SIG) constituem uma ferramenta poderosa, ao lidar com o espaço geográfico e

suas interações. O uso do SIG com dados obtidos por bases cartográficas confiáveis permite, com eficiência, precisão e rapidez, elaborar uma série de produtos os quais subsidiam a caracterização física de bacias hidrográficas possibilitando o cálculo da disponibilidade hídrica (MOREIRA et al, 2007)

Segundo Câmara (1995) o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Esta disciplina influencia de maneira crescente as áreas de recursos hídricos, cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional.

Muitos conceitos e definições são diferenciados entre os principais autores de publicações em geoprocessamento. Como um consenso entre estes vários conceitos, pode-se definir geoprocessamento como sendo a ação de manipular informações associadas a uma posição no espaço (informação georreferenciada) (ALMEIDA, 1999).

As técnicas de geoprocessamento auxiliam sobremaneira a caracterização de uma problemática ambiental. Assim, a preocupação citada por Leão et al. (2004) com os recursos naturais, incluindo-se os recursos hídricos é que tem ensejado, por parte de seus gerenciadores, uma demanda crescente por informações acerca de seus comportamentos ao longo do tempo e mediante a interferência das atividades humanas, consideradas, por muitos, as que mais degradam o ambiente e suas riquezas naturais.

### **2.3 Modelo Digital de Elevação**

Atualmente é possível arquivar eletronicamente a superfície de uma bacia hidrográfica e, a partir dessas informações, estudar e compreender sua fisiografia. Um arquivo digital representativo da variação real contínua do relevo de um terreno costuma ser chamado de Modelo Digital de Elevação ou, simplesmente, MDE. O MDE mais simples constitui-se de uma grade digital de células quadradas onde em cada nó é conhecida a altitude. A obtenção de MDE pode ser feita diretamente por medições sobre pares estereoscópicos de fotografias aéreas ou por interpolações de levantamentos topográficos. Pode-se obter o MDE a partir de imagens de satélite com limite de resolução. Para qualquer fonte, a representatividade do MDE de uma bacia está diretamente ligada à resolução espacial. Normalmente, quanto menor o tamanho do pixel, resolução espacial, mais representativo é o MDE, porém, melhores equipamentos, softwares informáticos e informações são exigidos (SILVEIRA, 2000).

A obtenção dos dados que subsidiem a caracterização de uma bacia tem sido facilitada sobremaneira através da modelagem numérica do terreno. Estes são comumente

empregados em hidrologia, devido ao fato dos canais de escoamentos superficiais serem controlados pela topografia (MOORE et al., 1991). MDE são usados para analisar redes de fluxos (TARBOTON, 1991), definir potencial de erosão (LUDWIG et al., 1996) dentre outras aplicações.

Pode-se obter um MDE através da utilização de várias técnicas, tais como: interpolação de curvas de nível, obtidos pela vetorização ou digitalização das folhas topográficas do IBGE; coleta de pontos em campo e posterior interpolação destes dados; e por modelos obtidos através de sensoriamento remoto, utilizando-se sensores SPOT, AsterDTM e RADAR Interferométrico.

Além da tecnologia de imageamento digital passivo, apareceram na última década, sistemas ativos com possibilidades de aplicação em mapeamento, competindo com a aerofotogrametria convencional: são os sensores de varredura a laser e o RADAR interferométrico.

Os sensores a laser medem a distância entre o sensor o objeto, e através de varredura dinâmica, conseguem determinar centenas ou milhares de pontos por segundo, com alta precisão. Este tipo de dispositivo é muito útil na geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) com alta confiabilidade e tem sido usado em projetos de engenharia e para gerar MDEs nacionais com alto grau de homogeneidade. O RADAR interferométrico, por outro lado, combina a tecnologia do RADAR de visada lateral (SLAR - Side-Looking Airborne Radar), já conhecida há mais de 30 anos, com uma segunda antena, que propicia o cálculo da distância entre a antena e o terreno. Com isto, além da resposta espectral, há uma informação que permite a reconstrução do Modelo Digital de Elevação com precisão sub-métrica. Ambas as tecnologias, entretanto, dependem do posicionamento dinâmico da aeronave, fornecido pelo sistema GPS e da determinação precisa da altitude, que deve ser feita com sistemas inerciais. Sem estes sensores adicionais, a informação gerada terá baixa qualidade. Além disto, o modelo numérico gerado estará relacionado à superfície de reflexão do sinal, tanto quanto aquele gerado por aerofotogrametria (TOMMASELLI, 2004).

Dados topográficos podem ser utilizados em numerosas aplicações e representam a base para a maioria dos estudos sobre a superfície terrestre. Entretanto, para muitas partes do mundo, os mapas topográficos são limitados, imprecisos ou simplesmente inexistentes. Deve-se considerar também que a falta de padronização nos métodos de aquisição de dados topográficos e de geração de bases de dados limita o escopo de estudos regionais e globais (SOUZA FILHO, 2003).



Esta heterogeneidade dificulta a continuidade espacial do tema altimetria para grande parte do território, sendo que as imagens do RADAR interferométrico disponibilizadas pela NASA se apresentam como a melhor alternativa para suprir esta carência. Segundo Souza Filho (2003), a missão SRTM obteve dados altimétricos com precisão compatível com mapas topográficos na escala de até 1:50.000. Vale lembrar que a melhor escala de mapeamento das cartas planialtimétricas desenvolvidas pelo Exército Brasileiro de todo o estado está relacionada à escala 1:100.000.

Um Modelo Numérico do Terreno para dados de altitude é chamado de Modelo Digital de Elevação (MDE). O mesmo é considerado hidrologicamente consistente quando representa adequadamente o relevo da região em estudo, a ponto de permitir a correta simulação dos processos hidrológicos ocorrentes na área. De acordo com ESRI (1997), a definição de um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) pode ser resumida como sendo “a melhor representação digital do relevo capaz de reproduzir, com exatidão, o caminho preferencial de escoamento da água superficial observado no mundo real” (MOREIRA, 2005).

Os MDEHC apresentam uma similaridade acentuada entre a drenagem derivada numericamente e a hidrografia real, estando isentos de sumidouros (depressões espúrias) que bloqueiem o trajeto do escoamento de água superficial (HUTCHINSON, 1989). Posteriormente, fazem-se refinamentos no modelo digital de elevação, ao longo da calha dos rios. Finalmente, deriva-se a direção de escoamento, assegurando-se que o escoamento superficial convirja para a calha do rio e, dentro da calha, para a foz da bacia.

#### **2.4 Missão topográfica por RADAR Interferométrico - SRTM**

A Missão Topográfica por RADAR Interferométrico, conhecida como SRTM (Shuttle RADAR Topographic Mission) colocou em órbita em fevereiro de 2000 a nave espacial Endeavour. Esta nave levou em seu compartimento de carga um equipamento SAR interferométrico (InSAR), operando nas bandas C e X. Uma haste mecânica presa à nave apresentava em sua extremidade duas antenas receptoras do SAR, bandas C e X (Figura 1). Ao longo de 11 dias, utilizando a técnica de interferometria de uma passagem, foi imageada 80% da superfície terrestre, compreendendo os paralelos 60° N e 56° S, fornecendo modelos tridimensionais com amplitude da grade de 30 metros (SRTM 1) e 90 metros (SRTM 3) (CHIEN, 2000).

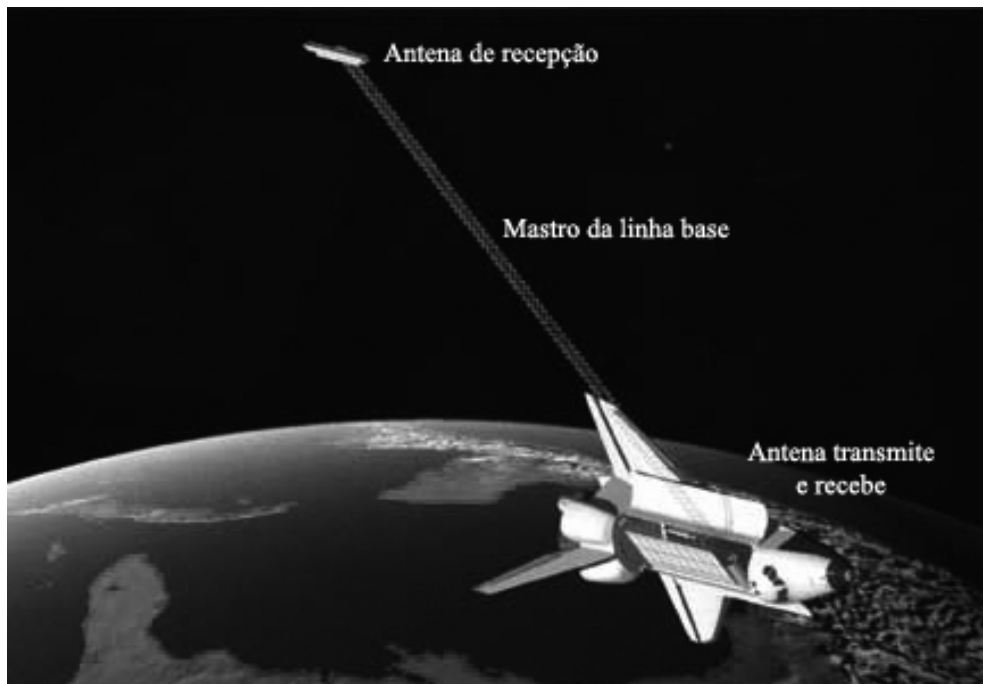


FIGURA 1 - Ilustração do ônibus espacial Endeavour na aquisição dos dados SRTM (adaptado de Rabus et al., 2003).

Os dados SRTM foram o resultado de uma missão espacial internacional que envolveu a NASA (National Aeronautics and Space Administration), a NIMA (National Imagery and Mapping Agency), o USDD (United States Department of Defense) dos Estados Unidos, a DRL (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) e a ASI (Agenzia Spaziale Italiana), e que teve como objetivo final a geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução da Terra, utilizando a interferometria de RADAR (SOUZA FILHO, 2003).

A missão SRTM contava com 2 antenas de recepção, separadas por um mastro de 60 metros (Figura 2). Os arquivos representativos dos MDE relativos à banda C estão sendo distribuídos pela NASA, já se encontrando disponíveis gratuitamente para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 x 90 metros. Há a possibilidade de se adquirir dados com resolução de 30 x 30 metros dependendo de acordos analisados individualmente pela NASA. Os dados relativos à banda X são processados e distribuídos pelo DLR – Centro Aeroespacial Alemão (JPL, 2007).

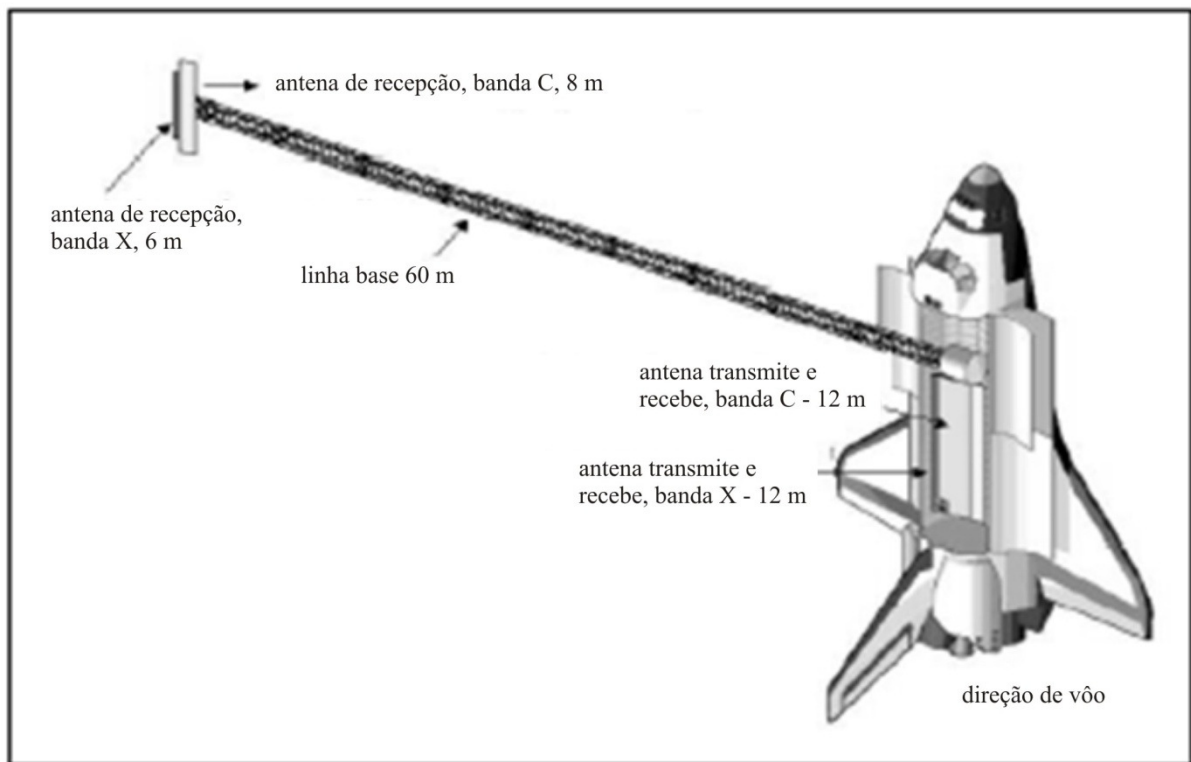


FIGURA 2 - Detalhes do RADAR Interferométrico (adaptado de Rabus et al., 2003).

A missão SRTM teve apoio de campo através de levantamentos geodésicos, realizado com o Sistema de Posicionamento Global (GPS), no modo cinemático. Este método permite determinar rapidamente linhas de posições dadas por um veículo em movimento. Aproximadamente 70.000 km de linhas foram coletados para apoio à missão, além de serem distribuídos, no terreno, refletores com coordenadas definidas para adquirir pontos de controle (VALERIANO, 2004).

Os dados SRTM disponibilizados para a América do Sul via internet (USGS, 2007) são organizados no formato de 1° por 1° e identificados pelas coordenadas latitude e longitude do canto inferior esquerdo (sudoeste). Exemplificando: S04W40 representa 04° de latitude Sul e 40° de longitude Oeste. Estes dados representam a altitude elipsoidal usando como referência o datum World Geodetic System 1984 – WGS-84. Esse produto topográfico traz expectativa de aplicabilidade para estudos que resultarão em um maior conhecimento e controle das variáveis fisiográficas da Região Semi-árida.

Como conseqüências dessa missão foram obtidos dados de elevação em escala global aproximada, gerando a mais completa base de dados digitais de alta resolução do planeta (NASA, 2007).

Os dados disponibilizados da SRTM podem ter uma grande aplicabilidade, pois os MDEs já se encontram disponíveis e de fácil acesso. Um ponto a seu favor, além da gratuidade para a resolução de 90 x 90 metros, é o uso da interferometria para o cálculo da altitude, que possui uma maior acurácia se comparada com a técnica da estereoscopia (CCRS, 2006). Apesar de alguns estudos indicarem que precisões melhores podem ser atingidas quando comparadas às obtidas antes da missão, a validação é necessária. Heipke et al. (2002), estimam em até 6 metros o erro vertical desse dados. Para atingir tais metas, os dados devem ser processados a fim de se eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes a áreas de sombra ao sinal. Rao (2004) em experimentos de campo encontrou erros menores que 5 m na vertical e de 2 a 3 pixels na horizontal, o que chama a atenção para a necessidade de validação também para deslocamentos dos dados.

As diferenças verificadas por Barros et al. (2005) apresentaram-se pequenas: sempre menores ou iguais a 20 metros, com média de 7,5 metros entre os 4 pontos avaliados. O mesmo qualifica o uso do MDE gerado pelo SRTM (banda C) para trabalhos que não exijam maior rigor na altimetria.

O consenso geral era de que a precisão da extração do MDE foi aproximadamente o terreno SAR resolução para ambos modo fino (12 m) e modo normal (20 m) por meio de média precisão GCPs (5-15 m) e que os grandes ângulos de intersecção *stereopairs* não necessariamente traduzirá em maior precisão MDE (SYLVANDER et al., 1997; RAGGAM et al., 1997; TOUTIN, 1999).

#### **2.4.1 Sistema de sensores ativos e RADAR interferométrico**

O RADAR (Radio Detecting and Ranging) é um sistema sensor ativo que opera na faixa espectral de radio ou de microondas. Seu princípio de funcionamento consiste na emissão de pulso de microondas e registro do sinal de retorno. O registro da energia refletida, após a interação do sinal com os alvos da superfície terrestre, contém duas grandezas distintas: o tempo de retorno e a intensidade do sinal (MOREIRA, 2005).

A Interferometria é a técnica da sobreposição de duas ou mais ondas (de entrada), o que cria como resultado uma nova e diferente onda (saída) que pode ser usada para explorar as diferenças entre as ondas de entrada. Uma vez que a interferência é um fenômeno geral entre ondas, a interferometria é aplicável a um largo espectro de campos, incluindo astronomia, física, oceanografia, sismologia e mecânica quântica.

Produtos de sensoriamento remoto são importantes fontes de dados em áreas extensas e de fácil acesso. O uso de imagens de RADAR para estudos ambientais é altamente vantajoso, principalmente em regiões tropicais onde a presença de cobertura de nuvens é freqüente. O fato de as microondas penetrarem nas nuvens garante uma constância na obtenção de dados da área estudada. A independência do solo como fonte de iluminação coloca como vantagem adicional a possibilidade de aquisição de dados à noite (NOERNBERG, 1996).

A interferometria de RADAR é um método alternativo ao método estereoscópico tradicional de extração de informações altimétricas, utilizando as propriedades de coerência do RADAR de Abertura Sintética (SAR) e aproveitando as vantagens dos sistemas de RADAR e do processamento digital de imagens (TOUTIN; GRAY, 2000). Por ser um sensor ativo, o RADAR não necessita de luz solar para o imageamento e, principalmente por atuar na região de microondas do espectro eletromagnético, não sofre influência significativa do ambiente, sendo independente da posição do sol (hora do dia), do clima e do contraste da superfície (DLR, 2007). Em função destas características a interferometria SAR possibilita a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), tão importantes para a cartografia, geomorfologia, geologia dentre outras (SANTOS et al., 2006).

A radiação na faixa de microondas é muito absorvida pela água; entretanto, isto irá depender da faixa de comprimentos de onda em que opera o RADAR. A radiação pode penetrar mais ou menos nas camadas superficiais dos alvos da superfície terrestre, com exceção, como foi mencionado, da água líquida, que provoca grande absorção e reflexão especular, fornecendo um retorno “*backscatter*” baixíssimo ou simplesmente não fornecendo retorno algum (nível de cinza zero). Quanto maior for o comprimento de onda, dentro da faixa de microondas, maior será a penetração na superfície, incluindo solos e dosséis vegetais. Com isso, o imageamento em áreas florestadas, numa banda de RADAR de grande comprimento de onda (banda L, por exemplo), forneceria maiores informações sobre a superfície de fundo (extrato inferior) do que uma de comprimento de onda menor (banda X, por exemplo) (Tabela 1). A faixa de microondas é dividida em bandas, designadas por letras e o espectro eletromagnéticos estão presentes na Figura 3. Os sensores que operam nesta faixa possuem a grande vantagem de adquirir dados independentemente da iluminação solar e de serem pouco influenciados pelas condições atmosféricas, uma vez que a transmitância atmosférica é praticamente inalterada para a faixa de microondas. Esta característica é particularmente interessante para regiões tropicais, onde sensores ópticos sofrem grande restrição devido à alta probabilidade de ocorrência de nuvens (DUTRA et al., 2003).

TABELA 1 – Designações das bandas de RADAR com ênfase nas bandas C e X da SRTM

Banda	Comprimento de onda (cm)	Frequência (MHz)	Utilização mais comum
Ka	0,75 – 1,10	40.000 – 26.500	Comunicações
K	1,10 – 1,67	26.500 – 18.000	Comunicações
Ku	1,67 – 2,40	18.000 – 12.500	comunicações e Radares de espaço aéreo
X	2,40 – 3,75	12.500 – 8.000	Radares de espaço aéreo e sensoriamento remoto
C	3,75 – 7,50	8.000 – 4.000	sensoriamento remoto
S	7,50 – 15	4.000 – 2.000	transponder de satélites de comunicações
L	15 – 30	2.000 – 1.000	sensoriamento remoto; VLBI*; GPS
P	30 - 100	1.000 – 300	sensoriamento remoto

Tabela adaptada de MOREIRA (2005) \* Very Large Baseline Interferometry.

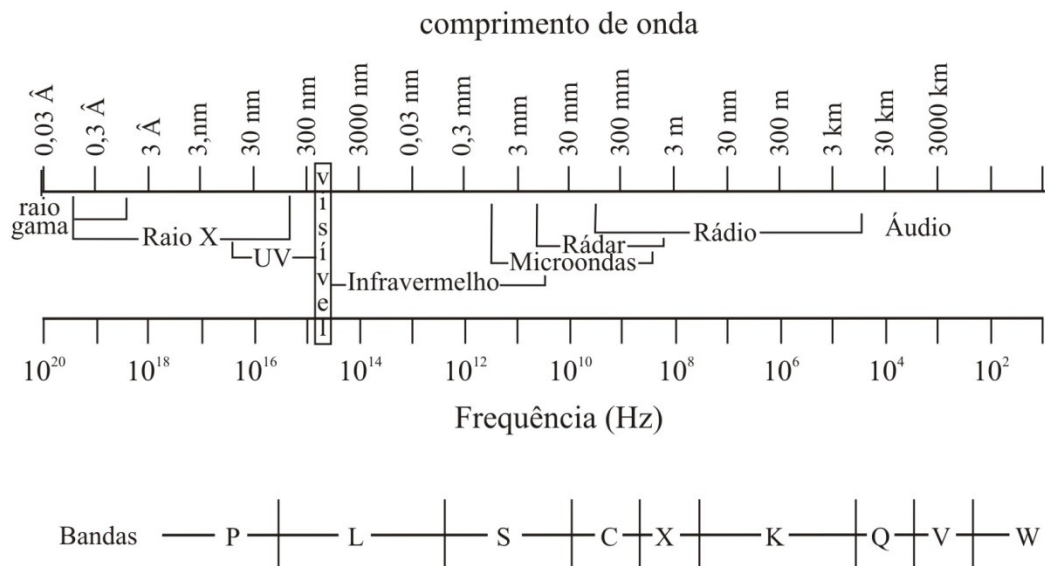


FIGURA 3 - Espectro eletromagnético e bandas espectrais (DUTRA et al., 2003).

#### 2.4.2 Retroespalhamento e influência da vegetação

Uma célula de resolução, representada na imagem pelo pixel, pode ser caracterizada por um conjunto de elementos difusores que, no caso da vegetação, ocupam um certo volume no espaço, distribuídos sobre uma superfície também difusora, representada pelo solo. O sinal de retorno, que chega até a antena proveniente desta célula de resolução é resultante da soma das contribuições diretas de cada elemento difusor e da superfície, e das reflexões múltiplas entre estes. A Figura 4 mostra esquematicamente as contribuições de um dossel (estrato superior da vegetação) agrícola no retroespalhamento (DUTRA et al., 2003).

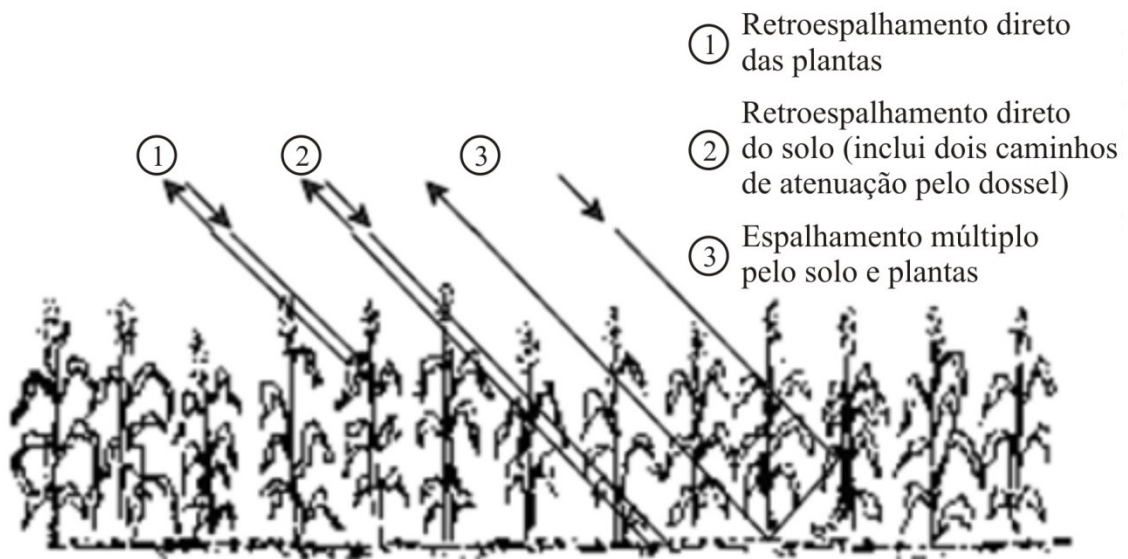


FIGURA 4 - Contribuições no retroespalhamento (DUTRA et al., 2003).

Ulaby et al. (1986) relacionam os parâmetros que influenciam no comportamento do retroespalhamento, quais sejam:

- Relativos ao dossel:

- A. A constante dielétrica da vegetação, que é fortemente influenciada pelo conteúdo de umidade. Este pode variar significativamente entre os diferentes constituintes do dossel (folhas, troncos e frutos) dependendo do estágio de desenvolvimento do dossel, causando, portanto, uma variação da constante dielétrica;
- B. O tamanho, a forma e orientação dos elementos difusores do dossel;
- C. A rugosidade e a constante dielétrica do substrato sob o dossel; e
- D. A geometria da cobertura do dossel (orientação e homogeneidade das estruturas da cobertura, porcentagem de cobertura, altura das plantas, etc.)

- Relativos ao sensor:

- A. A frequência da onda incidente;
- B. A direção da onda incidente, relacionada ao ângulo de incidência e ao ângulo azimutal; e
- C. A direção de polarização das antenas de transmissão e recepção.

Um dossel é um exemplo clássico de espalhamento do volume. Parte da energia enviada pelo RADAR é retroespalhada pela superfície da vegetação, e outra parte da energia, dependendo das características do RADAR usado e da estrutura do alvo, penetra no dossel sendo retroespalhada pelos elementos espalhadores (folhas, galhos, etc.) e pelo solo. O

espalhamento volumétrico depende, entretanto, da homogeneidade da superfície do alvo e das propriedades físicas deste, tais como: tamanho da folha, direção, umidade, densidade, altura, presença de vegetação rasteira, tipo de solo, etc., junto com as características do RADAR (como por exemplo: comprimento de onda, ângulo de incidência, polarização).

A profundidade de penetração da onda de RADAR na vegetação depende da umidade e densidade da vegetação, assim como do comprimento de onda. Quanto maior o comprimento de onda maior a penetração do dossel (Figura 5). O espalhamento do volume conta com a habilidade da microonda penetrar em certa cobertura do alvo e retomar sinais da subsuperfície alvo. Na maioria dos casos, o sinal resultante é a soma dos dois efeitos, em graus variados, dependendo da influência relativa da superfície dos mesmos (Figura 5) (NOERNBERG, 1996).

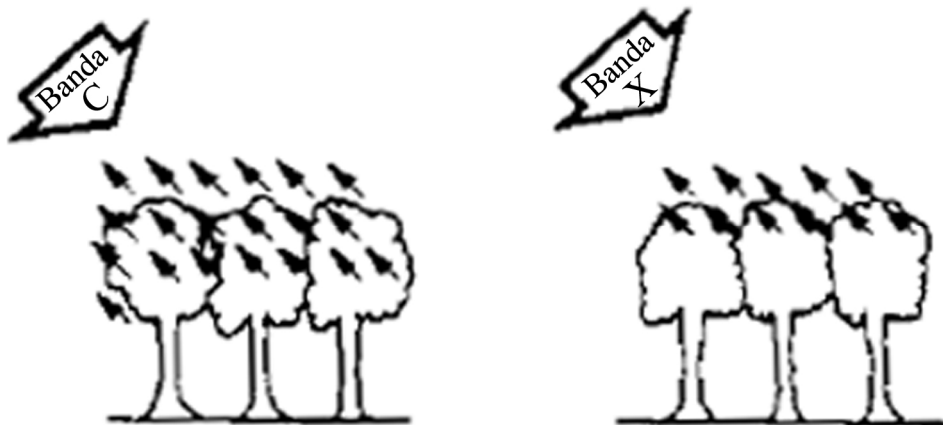


FIGURA 5 - Retroespalhamento nas bandas C e X (NOERNBERG, 1996).

Em alguns casos, o retorno da subsuperfície do alvo pode dominar a cena, sendo que neste caso a imagem gerada é da subsuperfície. Em áreas descobertas pode ocorrer a penetração da onda no solo, esta pode ser utilizada como um indicador de diferentes tipos de solos. Em solos homogêneos, este fato pode ser relacionado com a sua umidade. Em alguns casos, ambos os efeitos (retorno da superfície e da subsuperfície), podem ocorrer simultaneamente (TREVETT, 1986).

## 2.5 Vegetação

A caatinga descrita por Amorim et al. (2005) apresenta grande variação fisionômica, principalmente quanto à densidade e ao porte das plantas. Mudanças em escala local, a poucas dezenas de metros, são facilmente reconhecíveis e geralmente ligadas a uma alteração ambiental claramente identificável. É o caso do maior porte das plantas nos vales e



do menor sobre lajedos e solos rasos, em consequência da maior e menor disponibilidade hídrica. As variações numa escala de regiões, abrangendo milhares de quilômetros quadrados, são menos identificáveis, em virtude dos limites difusos, da causalidade múltipla e da variabilidade local interna a cada uma delas.

Cavalcante e Nascimento (2006) dividem a caatinga em três estratos: arbóreo (8 a 12 metros), arbustivo (2 a 5 metros) e o herbáceo (abaixo de 2 metros). Os mesmos estimam a ocupação deste bioma em quase 10% do território nacional, com 736.833 km<sup>2</sup>, abrangendo os estados do Ceará, Bahia, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Alagoas e Sergipe, além de pequenas porções de Minas Gerais e do Maranhão.

Para o estado do Ceará, Toniolo e Dantas (1994) dividiram a vegetação caatinga da Bacia do Jaguaribe em: arbustiva, arbórea, cerrado, mata úmida, vegetação de tabuleiro litorâneo, carrasco e vegetação de carnaúba. Os referidos autores estimaram a altura média de cada classe vegetacional, e dividiram, ainda, a bacia do rio Jaguaribe em três mesoregiões abaixo descritas.

**Mesoregião do Baixo Jaguaribe:** É composta por 13 municípios. A geologia é variada compreendendo o Grupo Barreiras, Dunas, Grupo Apodi e Rochas do Embasamento Cristalino, com altitude até 250 m. A precipitação varia de 750 mm a 1100 mm anuais. A vegetação é a do complexo vegetacional da zona litorânea, Caatinga Arbórea e Caatinga Arbustiva Densa. **Mesoregião do sertão:** É composta de 79 municípios. A geologia compreende a formação Serra Grande, Granito Meruoca-Rosário, Rochas de Embasamento Cristalino, Bacia do Iguatu-Icó, com altitude de 200 a 700 m, alcançando, em algumas serras, valores acima de 900 m. A precipitação varia de 550 a 1100 mm anuais. A vegetação é de Mata Úmida, Mata Seca, Caatinga Arbórea, Caatinga arbustiva Densa e Caatinga Arbustiva Aberta. **Mesoregião do Cariri:** É composta de 25 municípios. A geologia compreende o grupo Araripe e rochas de embasamento Cristalino, com altitude variando de 200 m, até 900 m. A precipitação varia de 850 a 1100 mm anuais. A vegetação é de Mata Úmida, Mata Seca, Cerrado, Cerradão e Caatinga Arbórea (TONIOLO e DANTAS, 1994)

Essas unidades são ressaltadas por Figueiredo (1991) como sendo resultado das diferenças litológicas, da compartimentação topográfica, do clima regional, dos mesoclimas e especialmente os solos que ocorrem no Ceará. Resultam ainda da evolução do ambiente físico global, cujas modificações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e especialmente climáticas tiveram importância fundamental no estabelecimento e na distribuição da vida

vegetal e na florística, principalmente nas últimas épocas geológicas com o estabelecimento da caatinga.

A cobertura vegetal da região Nordeste do Brasil é composta por diversos padrões morfológicos que dependem da fisiografia e das condições climáticas. A porção semi-árida dessa região destaca-se pela presença da formação vegetal caatinga arbustiva, densa ou aberta, que perde sua folhagem no período de estiagem, tornando a florescer no período chuvoso (BRAGA et al., 2003).

Segundo o IPLANCE (1998), podt ser destacados, no Ceará, nove tipos de vegetação. A de maior representatividade é a vegetação xerófila das caatingas, revestindo os aplainamentos sertanejos, os serrotes, as serras secas e vertentes ocidentais das serras úmidas. O tipo de vegetação florestal aparece em algumas áreas condicionadas pelas vertentes, em decorrência de precipitações orográficas ou de ressurgência de água. Indicativa de maior potencial para a produção agrícola em termos de clima e solo, essa vegetação ocupa, no entanto, setores com fortes impedimentos às atividades humanas: topos e vertentes.

## **2.6 Rede Altimétrica do IBGE**

O estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) teve início em 1945. Desde então, foram determinadas cerca de 65 mil Referências de Nível (RN), ao longo das principais rodovias e ferrovias brasileiras, correspondendo a mais de 160 mil quilômetros de duplo caminhamento de nivelamento geométrico. O desenvolvimento da RAAP pode ser dividido em três períodos (IBGE, 2007):

1. até 1969, foram cobertas as áreas de maiores densidade populacional e desenvolvimento econômico, correspondendo basicamente às faixas de poucas centenas de quilômetros do litoral. As redes altimétricas de outras instituições – como a do então Serviço Geográfico do Exército (SGE) na Região Sul, a do antigo Instituto Geográfico e Geológico (IGG) de São Paulo, e a do Departamento Geográfico do Rio de Janeiro – foram também aproveitadas;
2. de 1970 a 1980, a RAAP foi estendida ao interior do país e aos pontos mais distantes do Território Brasileiro servidos por rodovias, nos estados do Acre e de Roraima; e
3. a partir da década de 80, passaram a ser reconstituídos os trechos da RAAP nas áreas com alto índice de destruição das RNs e também naquelas em que, no passado, existiram as redes altimétricas de outras instituições.

Atualmente o IBGE utiliza com sucesso os padrões de posicionamento geodésico diferencial com GPS (Global Position System). Este sistema auxilia a situação de densificação de uma rede geodésica por um método que fornece uma precisão maior que a da própria rede para marcação das Referências de Nível (IBGE, 2007).

## 2.7 GPS Diferencial

O GPS (Global Position System) é o sistema de posicionamento global desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano, inicialmente com finalidade militar e posteriormente aberto para uso civil. Consiste no arranjo de 24 satélites NAVSTAR, orbitando a terra a cada doze horas a uma distância de 20.200 km, garantindo um posicionamento de alta precisão quando são utilizados no modo diferencial, receptores que trabalham com as frequências L1 e L2 (dupla frequência) e/ou precisão da ordem de três a dez metros, quando utilizados receptores comuns de navegação (DANA, 2008). Desde o lançamento dos primeiro receptores GPS, tem havido um grande crescimento no número de aplicações topográficas e cartográficas, devido às facilidades apresentadas por este sistema.

O GPS diferencial ou DGPS é um método largamente utilizado na correção de erros intrínsecos ao sistema, consistindo basicamente de um sinal adicional de um ou mais pontos referenciais em bases fixas. Objetiva corrigir erros de tendências no sinal medido em um dado local com a tendência medida por outro receptor em um ponto conhecido. O receptor de referência ou estação de base (base station) calcula a correção necessária para o sinal de cada satélite. Portanto, o receptor deve ser instalado próximo o suficiente da estação de base para que os mesmos satélites sejam visíveis pelos dois receptores.

A técnica chamada de “GPS diferencial” surgiu para reduzir, ou mesmo eliminar, os efeitos das diversas fontes de imprecisão. Com essa técnica, consegue-se obter excelente nível de precisão, sub-métrica ou até sub-centimétrica. Seu princípio é bastante simples: além do receptor GPS “*rover*”, isto é, que se locomove pelos pontos cujas coordenadas se deseja determinar, utiliza-se outro receptor GPS, chamado de “base” ou de “referência”, que permanece fixo, num ponto cuja posição é bem conhecida. Esse receptor de referência, utilizando os sinais que recebe dos satélites, determina a sua posição. Comparando-a com a sua posição real, previamente conhecida, ele pode, a cada instante, determinar o erro a que está sujeito o sinal enviado por cada satélite que ele avista. Dessa forma, o receptor de referência pode corrigir os erros dos sinais captados pelo receptor “*rover*”, assumindo que esses erros sejam iguais aos que afetam a determinação de sua própria posição.

Considerando que os erros por causas externas ao receptor, inclusive no modo diferencial, afetam duas medidas feitas por antenas próximas uma da outra de forma idêntica, as estimativas do efeito total destes erros em um receptor servem de correções em receptores na proximidade. Os erros atenuados desta forma são aqueles causados pela atmosfera e pelos relógios e órbitas dos satélites. O método diferencial pode ser aplicado às coordenadas das antenas receptoras, que permite o uso de receptores de navegação. Atendendo que as coordenadas das antenas sofrem efeito semelhante, em especial se observarem o mesmo conjunto de satélites, determinando o efeito conjunto dos erros nas coordenadas de uma antena de posição conhecida, pode corrigir-se as coordenadas de antenas na proximidade, em cada instante de medição (PRATES, 2004).

Apesar de o sistema contar com uma alta precisão para posicionamento, os pontos de GPS estão sujeitas a fatores que afetam a sua acurácia, gerando fontes de erros. As principais fontes de erro no sistema GPS estão relacionadas à propagação do sinal, ao satélite, as estações e ao receptor/antena (ELOI e SOUZA, 2006). Com o DGPS, parte dos erros devidos à propagação ionosférica, à disponibilidade seletiva e aos erros nas posições dos satélites (efemérides) são corrigidos (SOUZA, 2005).

As imprecisões introduzidas pelo próprio receptor, por exemplo, são específicas para cada aparelho: o receptor de referência não pode avaliar os erros provocados pelas características do receptor “*rover*”. Os efeitos do multicaminhamento são, também, particulares a cada receptor, e não podem ser corrigidos (DANA, 2008).

A informação orbital dos satélites vem referenciada no sistema de coordenadas denominado por World Geodetic System 84 (WGS84). O posicionamento que se obtém com esta técnica vem também referenciado no mesmo sistema de coordenadas (PRATES, 2004).

O GPS por ser um sistema que georreferencia o usuário para a sua perfeita localização na superfície da terra vem sendo cada vez mais utilizado na agricultura, permitindo a utilização de novos conceitos e práticas que originam a chamada agricultura de precisão.

## **2.8 Cartas planialtimétricas para o estado do Ceará**

Para o estado do Ceará, assim como para o Brasil, os mapas que permitem obter maior detalhe e determinação de algumas variáveis geralmente estão na escala 1:100.000. Esses mapas foram editados na década de 70 pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG) e obtidos junto ao Ministério do Exército, Serviço Geográfico do Exército Brasileiro ou à Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), Departamento

de Recursos Naturais, Divisão de Cartografia. Na escala de 1:100.000 existe uma boa cobertura de todo o território brasileiro, mas podem existir falhas em determinadas regiões (TUCCI, 2002). A geração destas cartas foi realizada pelo convênio DSG/ SUDENE em um levantamento planialtimétrico em meados de 1968 a 1973.

Entretanto, para utilização dos dados altimétricos deve-se atender ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, que é um conjunto de critérios e normas estabelecidas e que norteiam os processos de determinação e quantificação da exatidão de uma carta.

## 2.9 Bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica, fisicamente, é uma área cujo perímetro é determinado por divisores de água e no interior da qual se apresenta uma rede de fluxos em direção ao fluxo principal e a um exultório e por onde se verifica a drenagem da água captada entre os divisores.

Segundo Soulsby et al. (2004), as bacias rurais podem ser classificadas como micro, meso e macro-bacias (Tabela 2).

TABELA 2 – Tamanho de escalas de bacias hidrográficas rurais com suas respectivas áreas (SOULSBY et al., 2004).

Escala para bacias rurais	Área (km <sup>2</sup> )
Microescala	< 100
Mesoescala	100 – 1000
Macroescala	> 1000

## 2.10 Características morfométricas

As características físicas de uma bacia são elementos de grande importância em seu comportamento hidrológico. De fato, existe uma estreita correspondência entre estas e o regime hidrológico, sendo, portanto, de grande utilidade prática o conhecimento destas características. Com o estabelecimento dessas relações e comparações entre eles e dados hidrológicos conhecidos, podem-se determinar indiretamente os valores hidrológicos em seções ou locais de interesse nos quais faltem dados ou em regiões onde, por causa de fatores de ordem física ou econômica, não seja possível a instalação de estações hidrométricas. Pode-se dizer que estes elementos físicos constituem a mais conveniente possibilidade de se conhecer a variação no espaço dos elementos do regime hidrológico (VILLELA e MATOS, 1975).

Tendo em vista as dimensões das pequenas bacias, elas apresentam um grau de homogeneidade maior que as demais. Porém, a heterogeneidade natural das principais características físicas não pode ser desprezada. Em pequenas bacias, qualquer variabilidade passa a ter uma importância relativa maior do que em médias e grandes bacias, onde pequenas variações no valor de uma propriedade são “filtradas” pelo comportamento médio da mesma (GOLDENFUM, 2001). É, portanto, relevante um levantamento detalhado das características fisiográficas em pequenas e médias bacias hidrográficas.

Para a perfeita caracterização da bacia é fundamental um levantamento detalhado das seguintes características fisiográficas: Área e forma, densidade da rede de drenagem, comprimento da bacia e do canal principal e declividade (GREGORY; WALLING, 1973 *apud* GOLDENFUM, 2001).

A topografia em cartografia e geodésia é a representação dos elementos naturais e humanos da superfície terrestre, de modo que fiquem claras suas posições relativas e altitudes. A topografia se divide em hipsografia (estudo do relevo), hidrografia (os cursos d’água e condições de drenagem), vegetação (natural) e cultura (as modificações introduzidas pelo homem no meio físico). A hipsografia descreve a extensão e a elevação relativa da superfície.

Segundo Santos et al. (2007) o banco de dados hipsométrico formado para a geração do MDE pode ser atualizado através da sobreposição de imagens futuras que contenham mudanças ocorridas na superfície do terreno, possibilitando uma análise temporal da região em estudo com maior qualidade e rapidez, permitindo uma melhor padronização dos resultados, uma vez que utilizando o método tradicional não é possível obter a mesma precisão quando realizadas repetições.

Sob o ponto de vista hidrológico, as descargas provenientes de uma bacia hidrográfica são afetadas por fatores climáticos e fatores fisiográficos. O principal fator climático é a precipitação e suas propriedades (intensidade, duração, frequência, distribuição espacial e temporal). Os fatores fisiográficos incluem as características da bacia, como fatores geométricos e físicos, e também as características do canal, como a capacidade de descarga e a capacidade de armazenamento.

Os locais (vertentes, calhas, canos, canais, rios, córregos, etc.) que acomodam os fluxos de água de drenagem, quando estes seguem repetidamente o mesmo caminho, são ditos canais de drenagem. Na realidade, não é possível considerar as vertentes e os rios como entidades totalmente separadas, uma vez que estão continuamente em interação para adaptação da bacia hidrográfica às solicitações da natureza.

Sistemas naturais ou artificiais capazes de drenar água superficial, em geral provenientes das chuvas, são compostos de canais conectados entre si, e a este conjunto de canais conectados dá-se o nome de rede de drenagem.

Podem-se distinguir dois tipos importantes de redes de drenagem: as redes artificiais, construídas nas cidades pelo ser humano, e as redes naturais, compostas pelos rios e lagos. As redes de drenagem, portanto, dão o devido suporte e estabilidade à porção terrena do ciclo da água.

Uma superfície qualquer, em particular a superfície terrestre, na sua porção continental e ilhas, pode ser descrita como um conjunto de planos conectados, cada um com uma inclinação diferente. Com relação à ação da gravidade estes planos atuam como "rampas", por onde escoam inicialmente as águas das chuvas. Rampas opostas e conectadas por baixo formam, em sua porção mais baixa, os canais e represas. Rampas opostas e conectadas por cima formam divisores de águas.

O escoamento das águas na superfície terrestre converge para as partes mais baixas, e um conjunto de rampas com um escoamento central, sempre apresenta uma linha poligonal fechada formada pelos divisores de águas. Essa linha determina os limites de uma bacia hidrográfica. O relevo terrestre, tendo sido moldado pelas intempéries, inclusive da chuva e dos fluxos de água, por milhares de anos, tem sua forma afetada e acentuada pela formação das redes de drenagem.

O uso do sensoriamento remoto é uma das técnicas úteis que depende das características das imagens e das informações que necessitam ser obtidas da imagem. Geralmente, comprimentos e áreas são de fácil obtenção, enquanto altitudes, que permitem a determinação da declividade e larguras, podem apresentar erros de acordo com o tipo de sensor, tamanho do pixel, entre outros. Com o desenvolvimento dessas ferramentas e novos equipamentos, a tendência é de que o levantamento dos dados necessários à caracterização fisiográfica aumentará a precisão com redução de custo (TUCCI, 2002).

## **2.11 ArcHydro como ferramenta de geração de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC)**

Os métodos convencionais de obtenção manual das características fisiográficas das bacias hidrográficas a partir de mapas topográficos são tediosos e intensivos em mão-de-obra, representando sempre um grande desafio mesmo para técnicos experientes (GARBRECHT e MARTZ, 2000). Até o advento dos sistemas de informações geográficas, qualquer tentativa de obter parâmetros mais complexos como declividade, comprimento da

hidrografia, trajeto de escoamento superficial, área de contribuição etc. para grandes extensões era dificultada, sobremaneira, pelo volume de trabalho, limitando, assim, aplicações potenciais de análise de drenagem. Além disso, a ausência de padrões tornava virtualmente impossível o armazenamento e o compartilhamento desse tipo de informações analógicas. Dentre as vantagens de se adotarem abordagens automatizadas para tais processos, destacam-se a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, que podem então ser organizados e facilmente acessados sob a forma de bases de dados digitais (SAUNDERS, 1999).

A comparação visual descrita por Ribeiro et al. (2005) entre os resultados obtidos com uso dos dados SRTM e por restituição analógica de fotografias aéreas aponta para uma coincidência consideravelmente alta entre os dois métodos. Além disso, maior agilidade, confiança nos dados e possibilidade de utilização em Sistemas de Informações Geográficas.

A extensão ArcHydro é um modelo geo-espaco-temporal que funciona como extensão da plataforma ArcGis e que dispõe de ferramentas úteis para gerar as informações requeridas em várias análises hidrológicas, incluindo rede de drenagem e delimitação de bacias (MAIDEMENT, 2002). Tais ferramentas incorporadas pelo Centro de Pesquisa de Recursos de Água da Universidade do Texas, em Austin, Estados Unidos e outras organizações são bastante adequada à geração de um Modelo Numérico do Terreno. Olivera (2001) utilizou a versão anterior do ArcHydro que é a extensão CRWR-PrePro com sucesso, na obtenção de parâmetros de uma bacia hidrográfica necessários à simulação hidrológica através do software Hydrologic Modeling Systems – HMS do U.S. Army Corps of Engineers (USACE).

A ferramenta Terrain Preprocessing da extensão ArcHydro usa MDE (Modelo Digital de Elevação) para identificar o padrão da superfície de drenagem. Uma vez utilizados o processamento através desta ferramenta, o MDE e seus produtos derivados podem ser usados com eficiência para geração da rede de drenagem (ESRI, 2003).

Para isso deve-se considerar a indesejável existência de depressões e áreas planas nos MDEs pode resultar na geração de mapas de direção de fluxo com inconsistências. Para que isso não ocorra, o arquivo raster MDE (Modelo de Elevação Digital) deverá passar por um processo de preenchimento de sinks. Um sink é uma área rodeada por elevações com valores de cotas superiores, que pode ser associada a uma depressão. A maioria dos sinks pode ser considerada imperfeição no MDE. É importante entender bem a morfologia da área para saber distinguir entre o que são realmente “sinks” ou apenas dados errados (ROSKILDE UNIVERSITY, 2007).



Com a remoção das depressões a determinação na grade de fluxo acumulado, do valor que iniciará um curso d'água gera-se uma rede de drenagem. Segundo Mendes e Cirilo (2001), este valor mínimo de células contribuintes depende da resolução espacial do Modelo Numérico do Terreno, bem como dos objetivos do trabalho. A definição da rede de drenagem foi feita a partir da direção de fluxo acumulado, determinando um valor padrão para o início do curso. Maidement (2002) recomenda que este valor seja igual a um por cento do maior valor acumulado no curso. No entanto, a subjetividade exigida na determinação deste valor pode aumentar ou diminuir a densidade de cursos. Sendo este o principal fator de comprometimento da qualidade da rede de drenagem gerada a partir deste algoritmo.

Para Dias et al. (2004) para a geração dos limites das bacias hidrográficas e seus cursos d'água componentes, a extensão requer a indicação de uma área mínima para o conjunto de bacias a ser gerado. Isso não está de acordo com Maidement (2002), que utiliza o número de células com acumulação de fluxo necessária para iniciar um curso de drenagem e a partir daí gerar sua respectiva sub-bacia. Alguns autores como Costa et al. (2007a e 2007b); Gondim e Teixeira (2007), e Ogren (2004) utilizaram com sucesso este mesmo padrão para delimitar bacias e gerar redes de drenagens em bacias hidrográficas, facilitando sobremaneira o entendimento da dinâmica hidrológica com ganhos razoáveis de tempo de processamento de dados.

Oliveira et al. (2007) utilizando dados SRTM com resolução espacial de 90 m e a ferramenta "terrain preprocessing" da extensão ArcHydro do ArcMap formando rede de drenagem a partir de um total de 100 células contribuintes a fim de efetuar a delimitação automaticamente de uma bacia de aproximadamente 590 km<sup>2</sup> obtiveram estimativa de pico de descarga consistente em comparação com observação de campo. Os autores ainda recomendam a utilização da extensão ArcHydro para a delimitação automática de bacias.

Este processo permite levantar dados fisiográficos e hidrológicos em áreas que têm pouca disponibilidade de informações. Um dos passos para geração do MDEHC proposto neste trabalho é a verificação e correção das inconsistências da rede de drenagem. Este passo depende de um mapa de referência, preferencialmente, mais atualizado que os dados das cartas DSG/ SUDENE. Marques; Silva (2007) realizaram testes de comparação entre os dados altimétricos das cartas planialtimétricas, (carta homologada) e com os dados SRTM para geração de um MDEHC e indicaram sua viabilidade para utilização (interpretação visual e processamentos digitais) em processos de extração de características morfométricas.

Outro resultado satisfatório na utilização do ArcHydro foi obtido por Aquino et al. (2007) ao estimar perda de solo de uma micro-bacia hidrográfica utilizando a grade de

acumulação de fluxo, que é parte integrante do algoritmo da extensão ArcHydro, na obtenção do fator topográfico da equação universal de perda de solo.

Segundo Costa et al. (2007a) a subjetividade exigida na determinação da quantidade de células contribuintes necessárias para a obtenção de uma rede de drenagem pode ser minimizada quando se leva em consideração uma base de dados oficiais da área de estudo como referência para geração da rede de drenagem coincidente com a realidade. Os autores utilizaram como parâmetro para essa determinação, através do método de tentativa, o valor de células acumuladas que coincidissem com o início do curso principal da bacia estudada.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização da área de estudo

A área escolhida para desenvolvimento deste estudo é parte da Região Semi-Árida, no Estado do Ceará, na Bacia do rio Jaguaribe, delimitada pelos paralelos 4° e 8° S e meridianos 37° e 41° WGr (Figura 6).

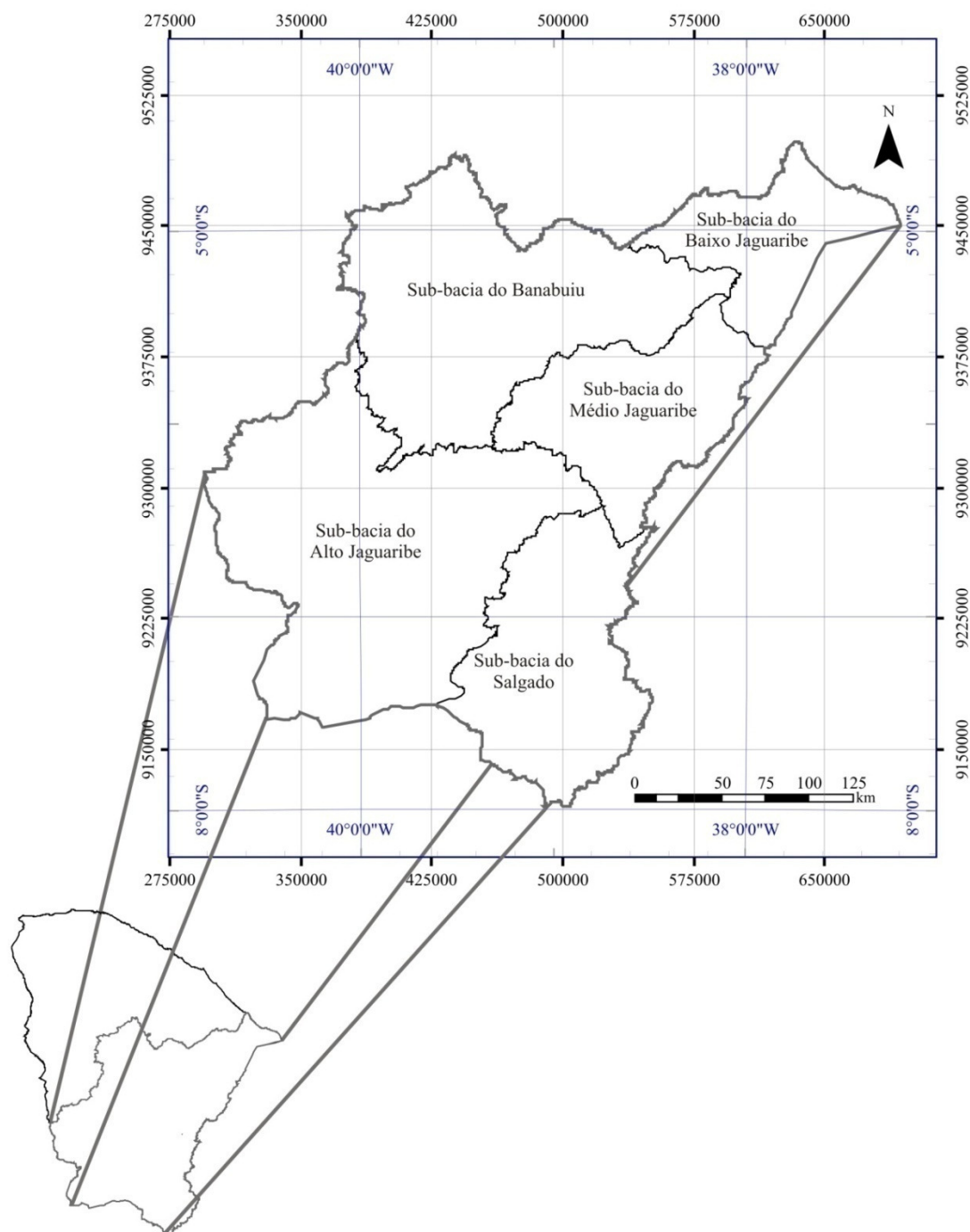


FIGURA 6 - Mapa do Ceará com ênfase à localização da área de estudo.

A escolha desta área é justificada pelas seguintes condições:

- disponibilidade de base cartográfica na escala de 1:100.000;
- disponibilidade de modelo SRTM (90 m);
- vegetação predominantemente de porte baixo em condições de clima semi-árido fortalecendo a hipótese de baixa interferência no erro dos dados SRTM para a região.

Além desses fatores que motivaram a escolha da área de estudo, a bacia hidrográfica do Jaguaribe, no Ceará, drena uma área total de 72.645 km<sup>2</sup>, ocupando cerca de 50% do território do Estado, abrangendo 80 municípios, e ainda abriga mais de 1/3 de sua população. Com a elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos em 1992, a mesma foi dividida em cinco sub-bacias: Alto, Médio e Baixo Jaguaribe, sub-bacia do Rio Banabuiú e sub-bacia do Rio Salgado (GARJULLI et al. 2001).

A região, por comportar os maiores reservatórios de água do Estado, incluindo o Castanhão, segundo maior do Nordeste, desempenha um papel estratégico na infra-estrutura hídrica que garante os usos múltiplos do extenso vale perenizado e, através do Canal do Trabalhador e Canal da Integração, integrando o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza e do seu parque industrial a Bacia do Rio Jaguaribe (ARAÚJO et al. 2006).

A Bacia do Jaguaribe apresenta um baixo rendimento hidrológico, razão entre vazão regularizável e vazão afluyente (CAMPOS, 1996), resultante da heterogeneidade hidroclimatológica em sua área de abrangência, tanto espacial como temporal, englobando grande parcela das regiões mais secas do Estado do Ceará, como a dos Inhamuns (precipitação inferior a 450 mm anuais), embora inclua também a região do Cariri (superior a 1.000 mm anuais) (BARBOSA et al., 2006).

O regime hidrológico dos cursos d'água na Bacia do Jaguaribe depende, na maioria dos casos, do escoamento superficial, uma vez que os rios, em quase sua totalidade, são efêmeros ou intermitentes, com solos rasos, com baixo percentual de cobertura vegetal, registrando fluxo somente na estação chuvosa (ARAÚJO et al., 2004).

### **3.2 Acesso e conversão dos dados SRTM**

Os dados fornecidos pela missão espacial precisam de validação para utilização dos mesmos em estudos hidrológicos, topográficos, entre outros. Essa validação visa estabelecer uma confiança maior na utilização destes dados.

Assim, acessou-se as imagens disponíveis para download no site de ftp (file transference protocol - protocolo de transferência de arquivos) da NASA, compactadas em

formato ZIP, e seguem a articulação de folhas de 1° x 1°. Para acompanhar a articulação, os arquivos encontram-se seguindo a seguinte documentação:

Para um arquivo de nome (S03W039) – s(sul) 03(latitude) w(oeste) 039(longitude) obtém-se os dados referentes à 1° a partir de 3° de latitude sul e 39° de longitude oeste.

Os arquivos depois de descompactados encontram-se no formato HGT, que não é suportado pela arquitetura do Arcview sendo utilizado o Global Mapper (GLOBALMAPPER, 2008) para auxiliar na conversão do formato HGT para o de grid do MDE, podendo, ainda, ser exportados para diversas extensões de arquivo. Neste trabalho foram utilizados arquivos convertidos para a extensão ASCII (American Standard for Code Information Interchange).

Cada arquivo contém 1201 linhas e 1201 colunas e as linhas e colunas das extremidades dos modelos sobrepõem-se e são idênticas às linhas e colunas das extremidades dos modelos adjacentes (SANTOS et al., 2006). As elevações ortométricas são representadas em metros e referenciadas para o Datum Vertical WGS-84 (padrão do Estados Unidos).

Os dados SRTM foram convertidos para a projeção UTM, Datum SAD/ 69 e Zona 24 S para utilização da mesma projeção e datum dos dados de RN do IBGE.

### 3.3 Mapa de vegetação

Utilizou-se como padrão de vegetação o levantamento feito pelo convênio FUNCEME/ SEPLAN (SEPLAN, 1994). Essa análise partiu da identificação, caracterização e mapeamento (escala 1:250.000) das unidades fitoecológicas do Ceará, para o que constatou-se a ocorrência de onze unidades, com evidente predominância da caatinga (SEPLAN, 1994). A vegetação empregada na validação dos dados gerados pela SRTM estão presentes na Tabela 3. Essas informações foram obtidas do mapeamento da Cobertura Florestal Nativa Lenhosa do Estado do Ceará, o qual foi elaborado por Toniolo e Dantas (1994).

A Figura 7 exibe as classes de vegetação obtidas através de trabalho desenvolvido pela FUNCEME (SEPLAN, 1994) e as RNs do IBGE. Observa-se que das 11 classes de vegetação identificadas, duas não apresentam dados de RN, são elas: floresta perenifólia paludosa marítima e cerrado. Portanto, estas classes não foram avaliadas quanto a interferência no erro altimétrico dos dados SRTM. As outras nove classes foram avaliadas, são elas: caatinga arbustiva aberta, caatinga arbustiva densa, carrasco, cerrado, complexo vegetacional da zona litorânea, caatinga arbórea, mata ciliar com carnaúba, mata seca, cerradão, matas úmidas.

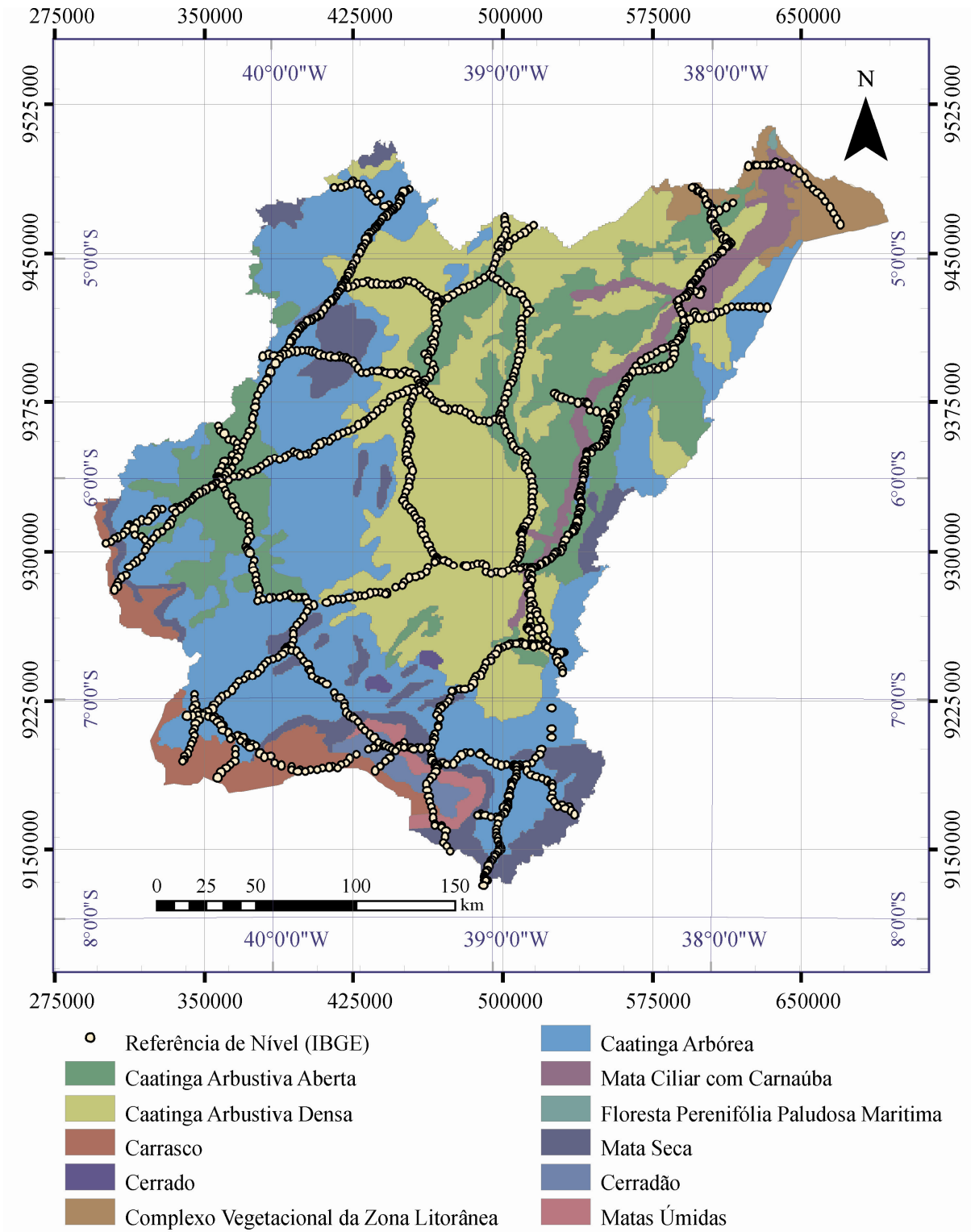


FIGURA 7 - Mapa da vegetação para a Bacia do Jaguaribe e RNs do IBGE.

TABELA 3 – Altura média das classes de vegetação que ocorrem na Bacia do Jaguaribe segundo Toniolo e Dantas (1994).

altura média (m)	Classes de vegetação
3,00	Caatinga Arbustiva Aberta Carrasco
4,00	Caatinga Arbustiva Densa Complexo Vegetacional da Zona Litorânea Floresta Mista Dicotilo-Palmaceae (Mata Ciliar com Carnaúba) Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial (Mata Seca)
5,00	Floresta Caducifolia Espinhosa (Caatinga Arbórea)
6,00	Floresta Subcaducifolia Tropical Xeromorfa (Cerradão) Floresta Subperenifolia Tropical Pluvio-Nebular (Matas Úmidas)

Adaptada de Toniolo e Dantas (1994)

Esse levantamento fitoecológico permite a análise da variação dos dados SRTM ante as RNs do IBGE em função das classes de vegetação predominante e em classes de altura média do dossel das mesmas.

### 3.4 Obtenção da base de dados altimétricos

#### 3.4.1 Acesso e conversão das Referências de Nível (RN) do IBGE

As RNs são homologadas pelo IBGE e neste trabalho foram utilizadas como referência altimétrica na comparação com os dados SRTM. O download dos dados do IBGE foi feito diretamente da sua página oficial (IBGE, 2007), onde estão disponíveis dados altimétricos para todo o Brasil (Figura 8). Em seguida selecionou-se os pontos que fazem parte da Bacia do Jaguaribe (Figura 9). Esses dados de altitude ortométrica vêm georreferenciados para projeção UTM, Datum Vertical SAD/ 69 Zona 24 S.

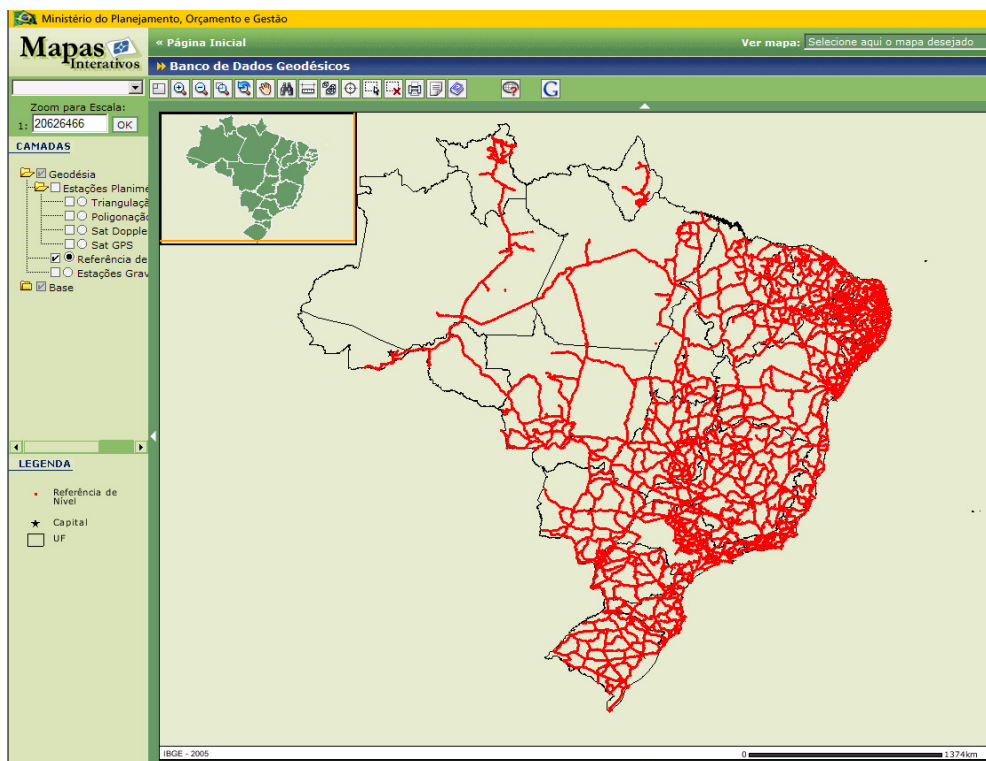


FIGURA 8 - Rede de Referência de Nível para o Brasil (IBGE, 2007).

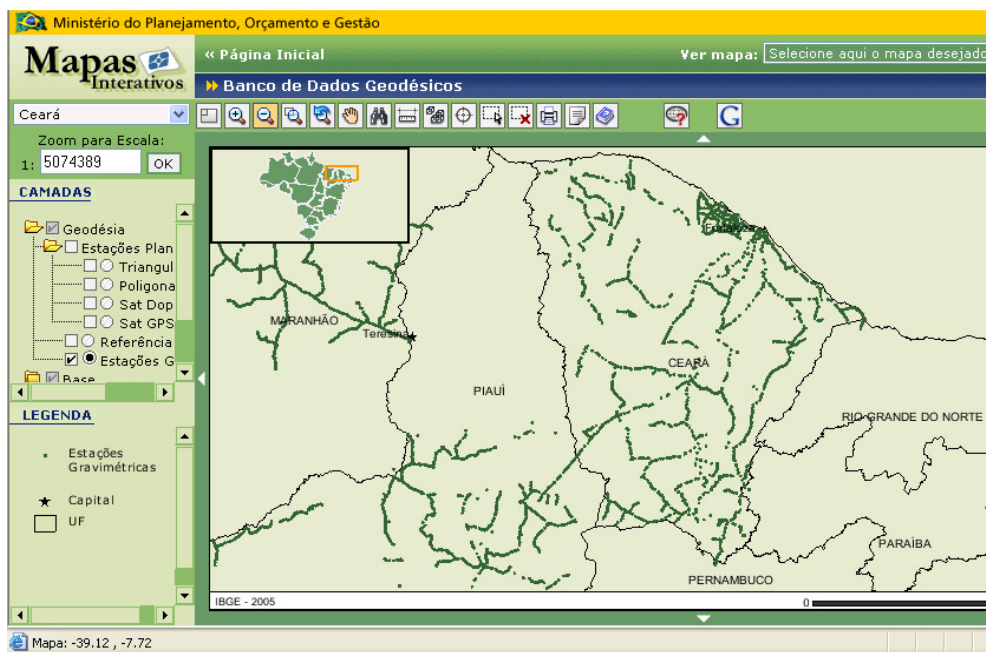


FIGURA 9 - Rede de Referência de Nível para o estado do Ceará (IBGE, 2007).



### **3.4.2 Dados de DGPS**

Dados de GPS Diferencial também foram utilizados como referência neste trabalho. Na determinação destes pontos desejava-se a identificação de uma área com relevo plano (declividades próximas a zero), sem interferência de elevações adjacentes e com uma cobertura vegetal conhecida e de pouca influência na resposta do sinal do sensor na data da passagem do RADAR.

Na Bacia do Jaguaribe, a região que melhor representa essas condições é o Perímetro Irrigado Jaguaribe Apodi, situado na Chapada do Apodi, local com relevo plano com sistema de cultivo irrigado por pivô central com culturas temporárias de porte inferior a 2,0 m e com disponibilidade de registro de imagens do satélite Landsat5 órbita 216 ponto 64 para a data de passagem da SRTM. Assim, definiu-se a distribuição dos pontos em relação ao pivô.

Os pontos DGPS considerados nessa pesquisa estão presentes na Figura 10.

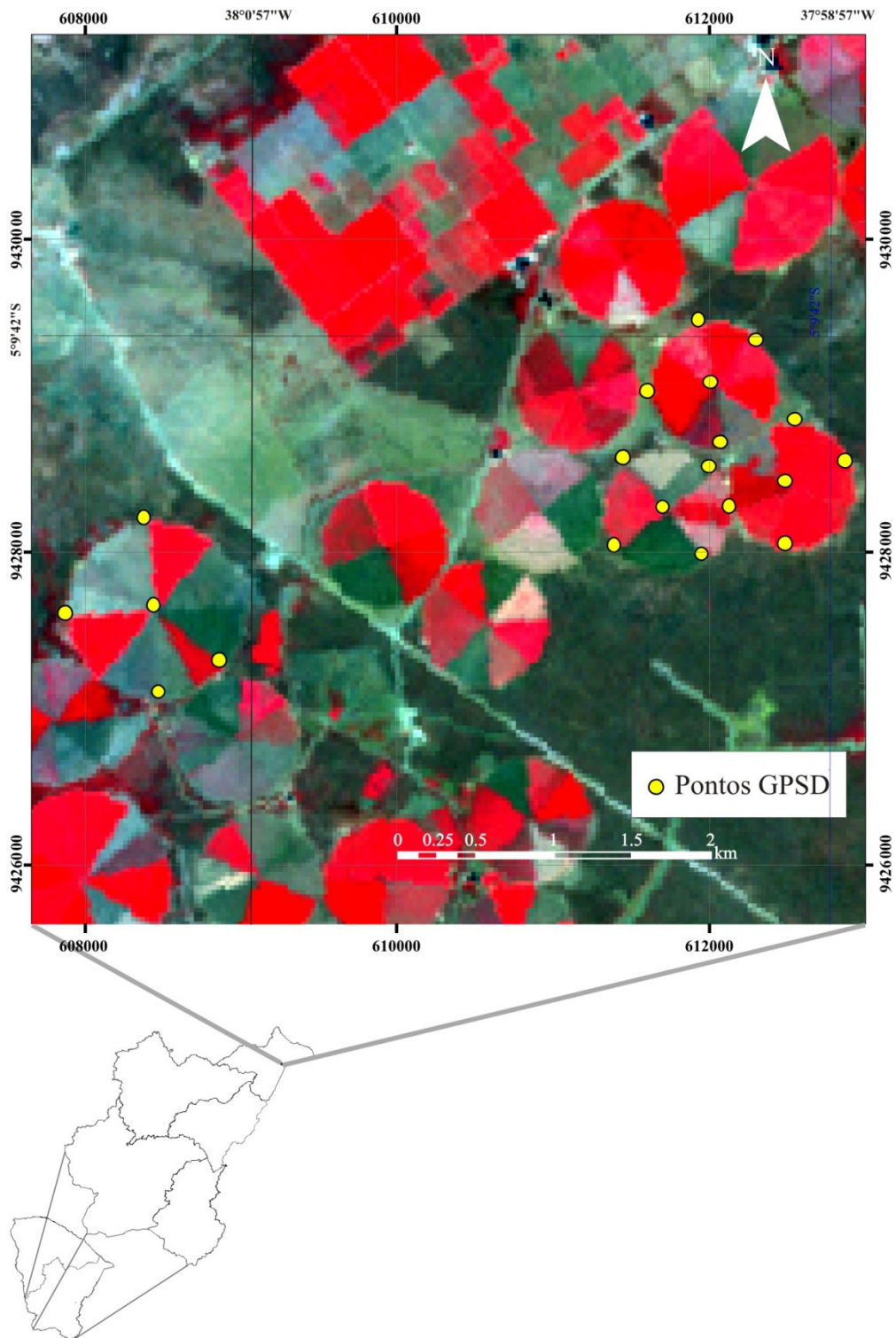


FIGURA 10 - Imagen Landsat 5 dos pivôs na Chapada do Apodi e pontos com DGPS.

### 3.4.2.1 Coleta de dados no campo com DGPS

No levantamento dos pontos de campo da área de estudo, foram utilizados dois receptores GPS Geodésicos de dupla frequência (L1 e L2) modelo LEICA GPS1200<sup>®</sup> com

precisão milimétrica para dados pós-processados. O datum WGS84 foi utilizado na missão de campo com posterior transferência para projeção UTM datum SAD/ 69 com uso do software Arcmap.

Para cada pivô definiu-se uma base com um receptor apoiado e nivelado em um tripé de base, onde por duas horas permaneceu aquisitando dados a uma taxa de um dado por segundo. Para uma melhor disposição dos pontos, procurou-se no levantamento, a formação de espaçamento por quadrante. Onde se definiram outros quatro pontos distribuídos na região periférica do pivô com outro receptor, idêntico ao receptor base, acoplado a um bastão com um tripé de sustentação com permanência de 15 minutos, aquisitando um dado por segundo.

Este procedimento foi realizado em quatro pivôs administrado pela Federação das Associações do Perímetro Irrigado Jaguaribe Apodi (FAPIJA) sendo três pivôs com raio aproximado de 400 m com área de 50 ha e um pivô com aproximadamente 600 m de raio e 100 ha. Estas informações de área e raio apontam a distribuição espacial da coleta dos pontos. Ressalta-se que os dados SRTM representam a altitude em pixel de 90 m de lado. Assim não há a possibilidade de haver sobreposição de informações destes pontos.

Com o procedimento de aquisição de pontos em quatro pivôs, um, total de 20 pontos de amostragem para validação da acurácia vertical dos dados SRTM com uso de GPS diferencial.

#### **3.4.2.2 Pós-processamento dos dados GPS**

O pós-processamento dos dados foi realizado no software “Leica Geo Office Combined<sup>®</sup>” com uso dos dados da base de referência fornecidos através da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) da estação Fortaleza 2005, identificação BRFT, situada no município do Euzébio, CE.

Os dados disponibilizados pelo IBGE/ INPE foram aquisitados a uma frequência de um dado a cada 30 segundos. No pós-processamento a partir de dados com taxas diferentes de aquisição de dados deve prevalecer a de menor frequência. Com esta taxa de aquisição, os receptores que permaneceram coletando dados por 15 minutos, ou seja, 30 informações por ponto, não teriam a consistência necessária para se fazer o pós-processamento. Assim, fez-se a transferência de base para os receptores que permaneceram na posição por duas horas para cada pivô, totalizando 240 informações por cada base instalada em cada pivô. Com este número de dados podem ser obtidos resultados consistentes de pós-processamento.

Com isso, utilizou-se a nova posição de latitude, longitude e altitude das bases localizadas na área de estudo possibilitando assim, o pós-processamento dos pontos que

permaneceram no campo por 15 minutos. Como todos os receptores DGPS do campo estavam configurados a aquisitarem dados a cada segundo foi possível efetuar o pós-processamento dos receptores de cada ponto auxiliar aumentando de 30 para aproximadamente 900 dados durante os 15 minutos de permanência. Isso torna ainda mais consistente os resultados do pós-processamento. Os dados de elevação foram convertidos para altitude ortométrica a fim de coincidir com a base de dados SRTM.

### **3.5 Validação altimétrica dos dados SRTM**

#### **3.5.1 Avaliação do efeito da vegetação na precisão da SRTM**

Os dados das RNs do IBGE e da SRTM foram dispostos em duas camadas (*layers*) no Arcmap e o mapa de vegetação em uma terceira camada. Gerou-se assim uma tabela com as informações das duas bases de dados de altitude e da classe de vegetação com os pontos homólogos para a Bacia do Jaguaribe. Duas colunas com informações advindas da base original foram adicionadas à tabela. Uma coluna com a variação entre os dados SRTM e as RNs do IBGE, e a outra com as alturas médias da vegetação proposta por Toniolo e Dantas (1994). Com esses dados organizados foi possível avaliar a acurácia vertical dos dados SRTM.

#### **3.5.2 Comparação dos dados DGPS com os dados SRTM**

A irrigação por pivô central possibilita a formação de uma massa vegetal com geometria circular além da perfeita distinção da vegetação de entorno devido à resolução espectral bem distinta da área irrigada.

Com os dados do DGPS pós-processados e georreferenciados com os dados da SRTM, complementou-se a comparação entre os pontos do DGPS e o SRTM na plataforma Arcgis. Gerou-se uma tabela com as altitudes dos pontos de DGPS para a área dos pivôs no Distrito de Irrigação Jaguaribe Apodi (DIJA) e as altitudes dos pontos homólogos dos dados da SRTM, além da variação entre eles, considerado neste trabalho como erro altimétrico.

#### **3.5.3 Avaliação da precisão dos dados SRTM**

Para a avaliação estatística dos dados SRTM efetuou-se a Análise de Variância (ANOVA) utilizando o pacote estatístico Sistema de Análise de Variância para Dados Balanceados - SISVAR (FERREIRA, 2000) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Com as variações de altitude, ou erros altimétricos utilizou-se o enquadramento do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (Tabela 4) para análise da acurácia dos dados. As cartas, segundo a sua exatidão posicional e precisão, devem ser classificadas de acordo com as categorias presentes na Tabela 4. As comparações são feitas levando-se em consideração as Normas Técnicas da Cartografia Nacional definidas no Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984 (BRASIL, 1984) para o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) altimétrico. No capítulo II, artigos 8º e 9º, deste decreto são definidas as seguintes características por categoria: categoria A - 90% dos pontos testados devem estar abaixo da metade da equidistância entre as curvas de nível (tolerância vertical), sendo de um terço da equidistância do Erro Médio Quadrático (EMQ) correspondente; para categoria B - 90% dos pontos testados devem estar abaixo de três quintos da equidistância entre as curvas de nível (tolerância vertical), sendo de dois quintos da equidistância do EMQ correspondente e a categoria C - 90% dos pontos testados devem estar abaixo de três quartos da equidistância entre as curvas de nível (tolerância vertical), sendo metade da equidistância do EMQ correspondente.

TABELA 4 – Padrão de exatidão cartográfico (PEC) (BRASIL, 1984) e valores de tolerância vertical e erro médio quadrático (EMQ) do PEC na escala de 1:100.000

Categoria	Tolerância	EMQ	Tolerância (m)*	Tolerância EMQ (m)
A	1/2 EQ	1/3 EQ	20,0	13,3
B	3/5 EQ	2/5 EQ	24,0	16,0
C	3/4 EQ	1/2 EQ	30,0	20,2

EQ = equidistância entre as curvas de nível; \* EQ=40,0 m

Os parâmetros estatísticos de avaliação considerados foram: média, desvio padrão das variações, erro médio quadrático (EMQ) e erro padrão. Além disso, foram analisadas as variações máximas e mínimas com seu respectivo número de dados.

A análise do Erro Médio Quadrático (EMQ) descreve a acurácia vertical de um MDE (Eq. 01), englobando erros aleatórios e sistemáticos introduzidos durante a produção dos dados (MILIAREISIS; PARASCHOU, 2005).

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (h - h')^2}{n}} \quad (01)$$

Em que:

EMQ = Erro médio quadrático

$h$  = altitude dos dados SRTM (m)

$h'$  = altitude da base de dados referencial (m)

$n$  = tamanho da amostra

Segundo Banzatto e Kronka (2006), o erro padrão (Eq. 02) dá uma idéia da precisão com que foi estimada a média da amostra. Quanto menor for erro padrão da média, melhor será a estimativa da média.

$$Erro_{padrao} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (02)$$

Em que:

$Erro_{padrao}$  = Erro padrão (m);

$\sigma$  = desvio padrão dos erros (m).

$n$  = tamanho da amostra

Ao correlacionar altitude em um mesmo ponto a partir de dados SRTM e RNs, pela regressão linear, foram considerados os seguintes indicadores estatísticos: precisão – coeficiente de correlação “r”; exatidão – índice de Willmont “d”; e de confiança ou desempenho “c”.

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente essa aproximação é dada por um índice designado de concordância, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de zero para nenhuma concordância, a 1, para concordância perfeita. O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (03)$$

em que:

$P_i$  é o valor estimado;

$O_i$  o valor observado e;

$\bar{O}$  é a média dos valores observados.

Segundo Camargo e Sentelhas (1997), o índice “c” indica o desempenho dos métodos, reunindo os índices de precisão “r” e de exatidão “d”, sendo expresso da seguinte forma:

$$c = r \times d \quad (04)$$

### 3.6 Geração de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente

As macro-bacias são formadas por meso-bacias que por sua vez representam um conjunto de micro-bacias. Como a resolução espacial dos dados SRTM é de 90 m, torna-se pouco consistente a caracterização fisiográfica com um número reduzido de pixels de micro-bacias segundo classificação proposta por Soulsby et al. (2004). Com essa resolução fica impraticável a aplicação em bacias com pequenas áreas, com poucos pixels, sem que seja utilizado um interpolador que se ajuste adequadamente à alteração na resolução espacial. Assim, nesse estudo optou-se por trabalhar com meso-bacias situadas em divisores topográficos de macro-bacias, formando bacias localizadas nos divisores topográficos de macrobacias com a mesma faixa de altitude e relevo.

A variabilidade dos solos e geologia não foi considerada, procurando assim obter maiores contrastes na avaliação da caracterização morfométrica a partir dos dados SRTM e dos dados oriundos das cartas planialtimétricas DSG/ SUDENE.

As cartas utilizadas nesse estudo estão presentes na Tabela 5. As mesmas foram utilizadas as seguintes cartas editadas pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG) e pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

TABELA 5 – Descrição das cartas DSG/SUDENE utilizadas na validação do MDEHC.

Nome	Identificação	Tamanho	Escala
Jaguetama	SB-24-X-C-IV	30' X 30'	1:100.000
Orós	SB-24-Z-A-I	30' X 30'	1:100.000
Senador Pompeu	SB-24-V-D-VI	30' X 30'	1:100.000
Iguatu	SB-24-Y-B-III	30' X 30'	1:100.000

Foram convertidas para meio digital por “escanerização” e vetorização, além disso, georreferenciadas no Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Ceará. Os arquivos vetoriais da rede de drenagem e curvas de nível foram obtidos utilizando edição manual empregando-se o software ArcMap, utilizando os divisores topográficos como critério para delimitação de bacias.

Os dados altimétricos básicos, necessários para caracterização morfométrica foram obtidos nas cartas DSG/ SUDENE através das curvas de nível, equidistantes 40 m no sentido vertical, e seguindo critérios de interpolação linear com prioridade às cotas da RNs e altitudes confirmadas segundo a legenda das próprias cartas. A caracterização morfométrica das meso-bacias foi obtida a partir destas cartas, as quais são homologadas pelo IBGE. Elas foram utilizadas como valores referenciais para posterior comparação com os resultados

oriundos do Modelo Digital de Elevação do SRTM e a extensão ArcHydro para a delimitação automática das bacias dos açudes Joaquim Távora, Nova Floresta e Jenipapeiro (Figura 11).

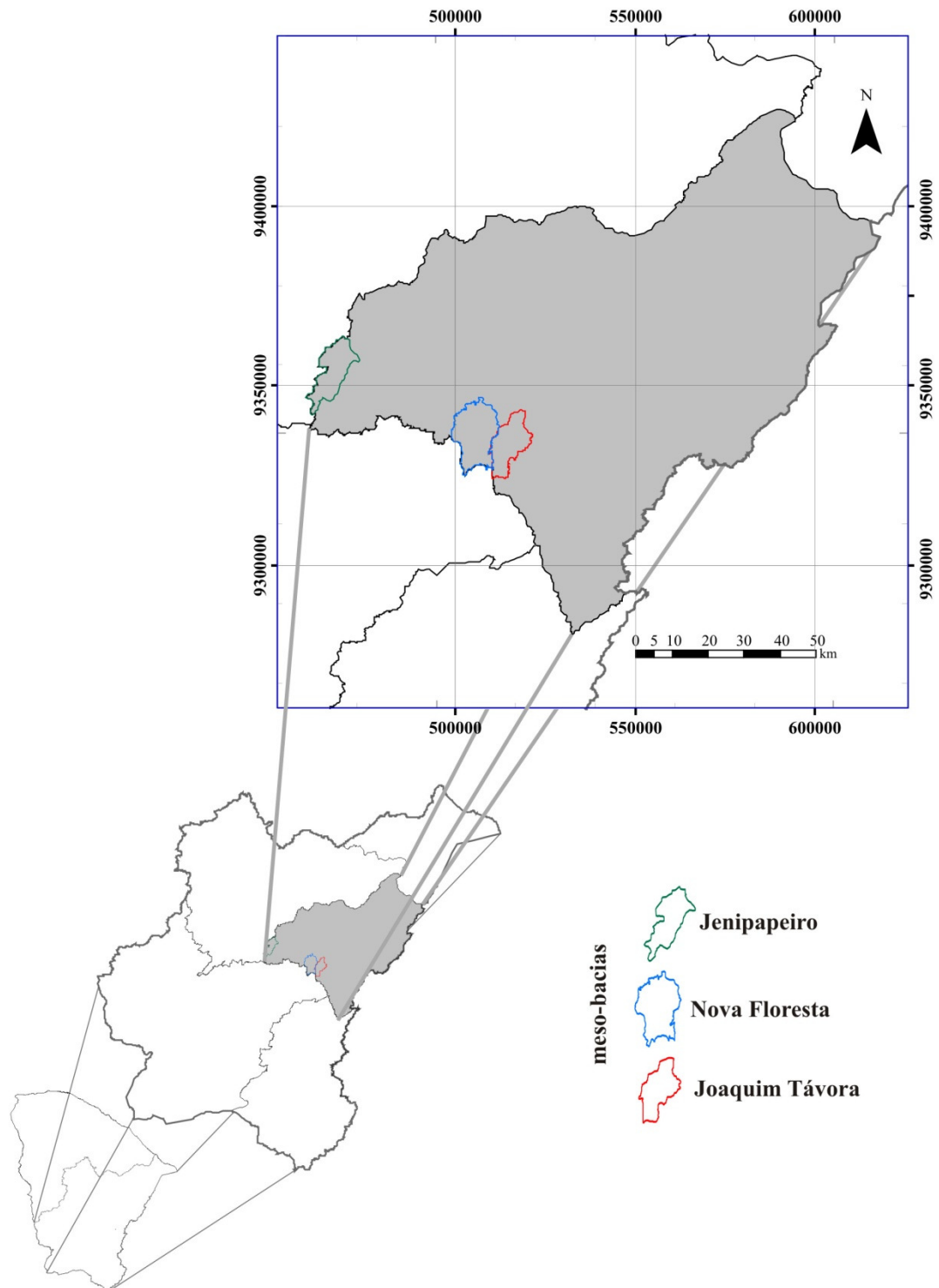


FIGURA 11 - Mapa do Ceará com ênfase à Bacia do rio Jaguaribe e localização da área de estudo.



Para atender a demanda técnica da modelagem consistente do relevo em SIG e sua integração com outras informações, foram realizadas operações a fim de garantir a convergência do escoamento superficial até a foz da hidrografia. Foi desenvolvida uma metodologia reunindo o máximo de processos automáticos que pudessem ser reproduzidos, por qualquer pessoa em qualquer bacia, com o mínimo de intervenções manuais.

Com os dados da missão SRTM foi utilizada a metodologia descrita no fluxograma representado na Figura 12 que ilustra as etapas envolvidas na geração do MDEHC.

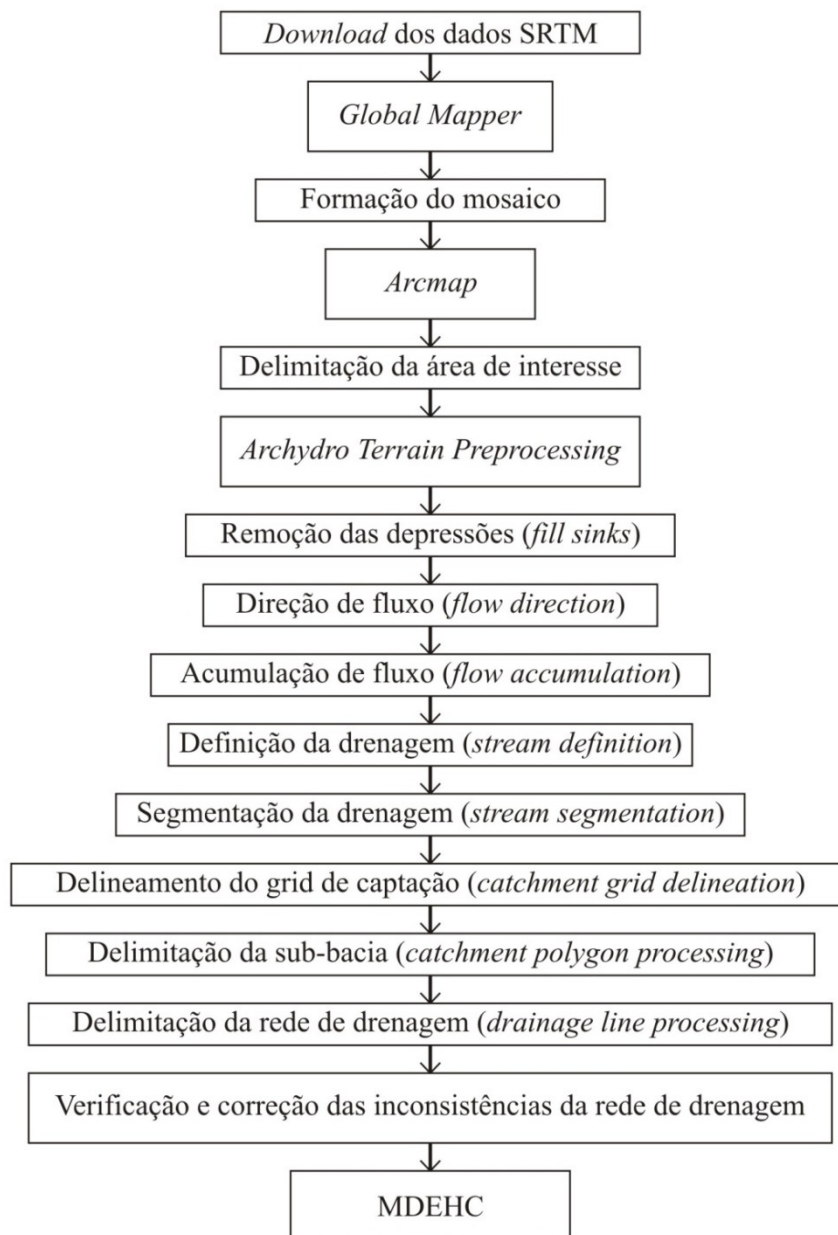


FIGURA 12 - Fluxograma para geração de um MDEHC

### 3.6.1 Delimitação automática de bacias (*ArcHydro Terrain Preprocessing*)

A geração de bacias hidrográficas através da utilização do MDE obtido do SRTM seguiu a seguinte seqüência, conforme Olivera et al. (2002) e ilustrados na Figura 12. As etapas de preenchimentos de depressões espúrias, definição da direção de fluxo, definição do fluxo acumulado e a delimitação automáticas das bacias hidrográficas. Estão disponíveis na ferramenta Terrain Preprocessing da extensão ArcHydro, e auxiliam sobremaneira o refinamento do MDEHC.

#### Remoção das depressões espúrias (*fill sinks*)

As depressões espúrias ou *sinks* são considerados impedimentos ao escoamento, quando da aplicação de modelos chuva-vazão, modelos sedimentológicos e de poluentes de origem difusa (MENDES; CIRILO, 2001). As Figuras 13 (a e b) e 14 (a e b) ilustram o processo de remoção dessas depressões através do comando *fill sinks* da extensão ArcHydro (ESRI, 2003), sendo o primeiro tratamento dado à matriz de altitudes, o qual consiste no preenchimento de pequenas depressões que possam ser originadas, erroneamente, no processo de montagem de um MDEHC. A Figura 13a apresenta ainda a localização das barragens dos reservatórios utilizados neste estudo e a correção de altitude com a retirada de valores espúrios (Figura 13b).

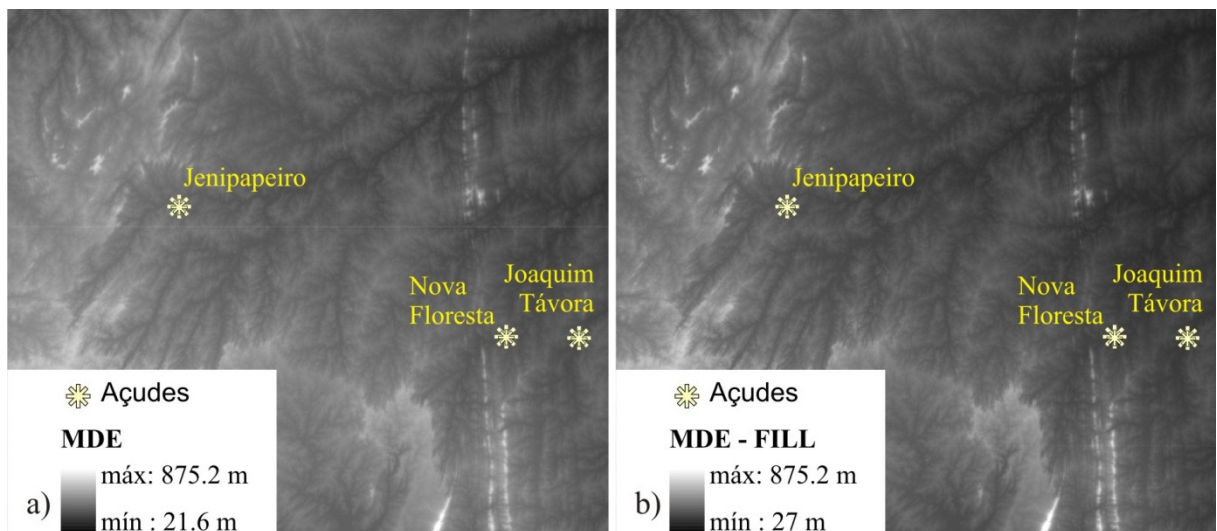


FIGURA 13 - Remoção de depressões espúrias do MDE da área de estudo.

A Figura 13a apresenta ilustração de uma grade de altitude com depressões espúrias que impedem o algoritmo de identificar um fluxo preferencial coerente nas células adjacentes e a Figura 13b com as respectivas correções a fim de evitar inconsistência no MDE devido às depressões. Essa função promove na grade um ajuste nas células de maneira que

não haja interrupção no fluxo de água devido a células com valores que não apresentem continuidade.

258	256	245	237	239	236	235	237	248
260	230	223	217	<b>180</b>	219	217	218	220
275	218	215	213	215	214	216	212	213
275	249	235	215	209	213	212	210	212
250	<b>203</b>	235	225	207	221	205	217	218
255	248	228	218	220	204	213	215	225
240	230	220	225	223	209	201	206	209
247	257	253	234	225	219	208	197	205
256	258	254	258	232	220	215	195	201

a)

258	256	245	237	239	236	235	237	248
260	230	223	217	<b>218</b>	219	217	218	220
275	218	215	213	215	214	216	212	213
275	249	235	215	209	213	212	210	212
250	<b>245</b>	235	225	207	221	205	217	218
255	248	228	218	220	204	213	215	225
240	230	220	225	223	209	201	206	209
247	257	253	234	225	219	208	197	205
256	258	254	258	232	220	215	195	201

b)

FIGURA 14 - Ilustração do processo de remoção das depressões espúrias do MDE.

#### Direção de fluxo (*flow direction*)

A direção de fluxo superficial de água (*flow direction*) é calculada através do método determinístico considerando a direção de maior declividade (gradiente topográfico) de um pixel em relação a seus 8 pixels vizinhos (ESRI, 2003). Tem a finalidade de montar uma grade digital onde o valor de cada pixel representa a direção do escoamento da água. Cada pixel recebe um valor que representa a direção para onde a água segue até chegar a ele. Os números convencionados indicam a direção do escoamento: 1 – leste; 2 – sudeste; 4 – sul; 8 – sudoeste; 16 – oeste; 32 – noroeste; 64 – norte; e 128 – nordeste (Figura 15a). Gera-se uma grade com estes números (Figura 15b) representando numericamente a direção do fluxo preferencial dos pixels (Figura 15c). Esta direção será aquela que levará a água para o pixel vizinho de menor valor de altitude (OLIVERA et al., 2002).

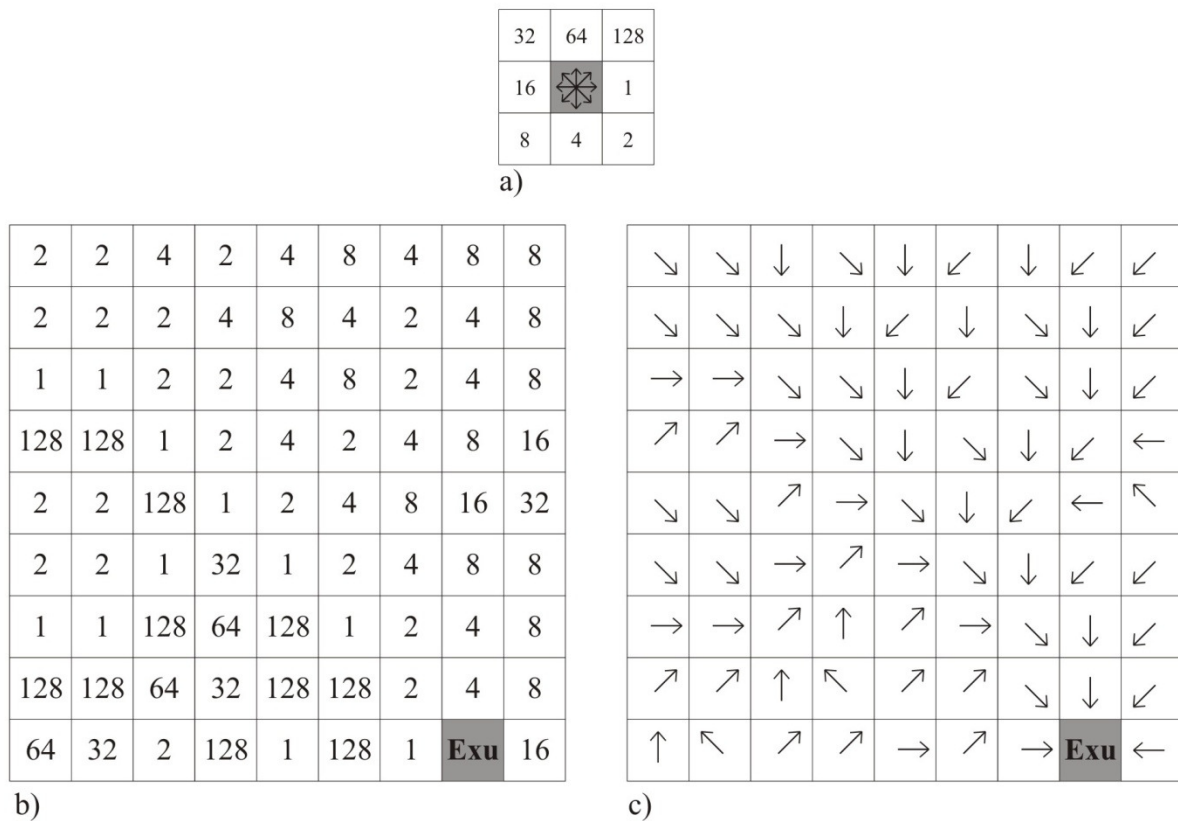


FIGURA 15 - Desenho esquemático da direção de fluxo dos pixels vizinhos com ênfase ao exultório (Exu) da grade.

### Acumulação de fluxo (*flow accumulation*)

Segundo Oliveira et al., 2002, após a elaboração dos arquivos de direção de fluxo, foi realizado o cálculo das direções de fluxo acumuladas (*flow accumulation*), o qual representa a rede de drenagem sendo possível montar uma nova grade, contendo os valores de acúmulo da água em cada pixel (ESRI, 2003). Cada pixel recebe um valor correspondente ao número de pixels que contribuem para que a água chegue até ele. A partir da direção de fluxo, a matriz de fluxo acumulado é obtida somando-se a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (Figura 16).

1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	3	1	4	1	3	2	1
1	4	<b>8</b>	<b>9</b>	1	2	1	<b>7</b>	1
1	1	1	<b>11</b>	<b>13</b>	1	1	<b>12</b>	1
1	1	1	1	<b>42</b>	1	<b>16</b>	1	1
1	2	2	<b>17</b>	1	<b>62</b>	1	1	1
1	<b>6</b>	<b>13</b>	1	1	3	<b>69</b>	2	1
3	1	1	2	2	1	3	<b>73</b>	1
1	1	1	1	1	2	1	<b>81</b>	1

FIGURA 16 - Ilustração do processo de obtenção do fluxo acumulado (*flow accumulation*), onde os números representam a quantidade de células contribuintes.

#### Definição de drenagem (*stream definition*)

Na Figura 17 pode-se observar a influência do número mínimo acumulado de células contribuintes (*threshold*) na geração da rede de drenagem (ESRI, 2003). Neste exemplo foram considerados necessários cinco pixels contribuintes para dar início a um curso d'água. Observa-se uma variação considerável caso fosse utilizado na matriz abaixo um total de 50 células contribuintes.

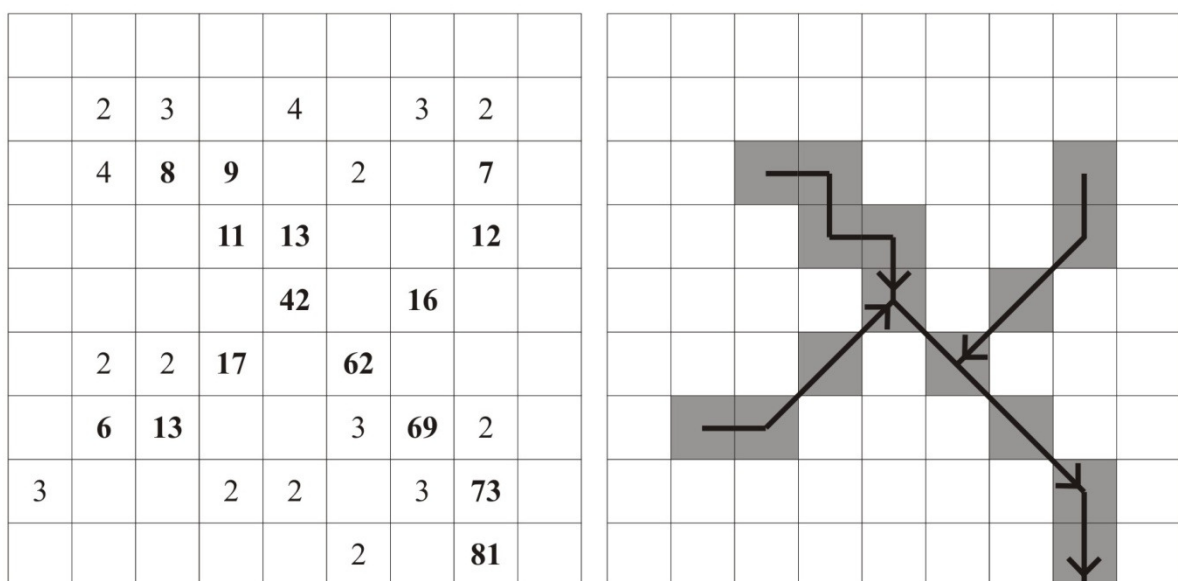


FIGURA 17 - Desenho esquemático do fluxo acumulado (*flow accumulation*).

### **Segmentação da drenagem (*stream segmentation*)**

Em seguida usa-se a função segmentação de curso (*stream segmentation*) para criar uma grade com a rede de fluxo que tem uma única identificação. Todas as células da grade têm um valor, que é específico para esse segmento do trecho (ESRI, 2003). Gera-se então uma malha de drenagem e suas respectivas bacias são delimitadas automaticamente a partir do reconhecimento de uma confluência ou bifurcação. É a partir destes trechos que se faz a união dessas sub-bacias concluindo a delimitação da bacia de interesse e sua respectiva rede de drenagem. A Figura 16 mostra as células que não recebem contribuição de outras sem valores e o curso vetorizado no esquema da geração de uma rede de drenagem a partir da ferramenta Terrain Preprocessing do ArcHydro.

Seguindo a metodologia acima descrita, e usando uma variação do valor de acumulação, gerou-se uma nova delimitação para as três meso-bacias afluentes do rio Jaguaribe a partir dos dados SRTM com a caracterização morfométrica para essas variações. As redes de drenagens geradas por 25; 50; 75; 100 e 125 células contribuintes (áreas respectivas de 0,203; 0,405; 0,608; 0,810; 1,013 km<sup>2</sup>) foram utilizadas para posterior comparação das características morfométricas (Tabela 8).

As formas de relevo representam a superfície da terra, qualificam condições de declividade, comprimento de encostas e configuração superficial dos terrenos, que afetam as formas de modelado (formas topográficas) de áreas de ocorrência das unidades de solo. As distinções que são empregadas para prover informação sobre praticabilidade de emprego de equipamentos agrícolas, mormente os mecanizados, e facilitar inferências sobre susceptibilidade dos solos à erosão estão expostas na Tabela 6 (EMBRAPA, 1999). Esta classificação foi utilizada neste trabalho para identificação das áreas de relevo semelhante, salientado que, por se tratar de um algoritmo matemático, outros valores de *threshold* devem ser utilizados para as demais formas de relevo.

TABELA 6 – Enquadramento do relevo a partir das características topográficas (EMBRAPA, 1999).

<b>Classe de relevo</b>	<b>Característica do relevo</b>
Plano	Superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades de 0 a 3%
Suave ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjuntos de colinas e/ ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50 m e de 50 a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves. Predominantemente variáveis de 3 a 8 %
Ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8 a 20 %
Forte ondulado	Superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ ou morros (elevações de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes relativas, respectivamente) e raramente colinas, com declives fortes, predominantemente variáveis de 20 a 45 %
Montanhoso	Superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, predominantemente variáveis de 45 a 75 %
Escarpado	Áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos, tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias, vertentes de declives muito fortes, usualmente ultrapassando 75 %

#### **Delineamento do grid de captação (*catchment grid delineation*)**

Esta função cria uma malha em que cada célula recebe um valor (código de rede), indicando a que área de captação a célula pertence. O valor corresponde ao valor transportado pela rede de drenagem para essa área, definido no fluxo de entrada (*threshold*) (ESRI, 2003). A partir da grade de ligação à rede de fluxo (cada ligação entre dois cruzamentos da rede de drenagem, recebe um identificador único) identificando os pixels que correspondem a uma mesma área de contribuição (bacia).

#### **Delimitação da sub-bacia (*catchment polygon processing*)**

Neste processo ocorre a transformação do raster em polígono (*shape*) com as bacias geradas no processo automático para cada curso d'água (ESRI, 2003).

#### **Delimitação da rede de drenagem (*drainage line processing*)**

A partir de um ponto de drenagem no ponto mais a jusante da bacia (centro de uma rede de células com o maior valor no fluxo de acumulação) (ESRI, 2003). Neste processo ocorre a geração da rede de drenagem.

### 3.6.2 Validação dos dados SRTM a partir do algoritmo ArcHydro

Para validação do MDEHC é necessário fazer a verificação e correção das inconsistências da rede de drenagem. Para isso, utilizou-se as meso-bacias delimitadas e caracterizadas pelos dois métodos, Cartas topográficas DSG/ SUDENE e através da extensão ArcHydro (MAIDEMENT, 2002) com dados SRTM, foram comparadas através dos seguintes atributos: área, perímetro, comprimento da bacia, comprimento e densidade da rede de drenagem, comprimento e declividade do curso principal, fator de forma e coeficiente de compacidade, altitude máxima e mínima, sinuosidade do rio principal, extensão média do escoamento superficial e perfil longitudinal, estimados segundo metodologia descrita por Villela e Mattos (1975), declividade média da bacia por Gordon et al. (1992) e tempo de concentração estimado segundo Silveira (2005).

- Área e perímetro da bacia ( $A$ )

A área de drenagem foi obtida através da extensão XTOOLS (DATA EAST, 2006) do software ArcMap.

- Comprimento da bacia ( $Lb$ )

O comprimento da bacia foi obtido pela medida da distância entre a sua foz e o ponto localizado no perímetro da bacia que a divide ao meio e mensurado com auxílio da extensão XTOOLS do software ArcMap.

- Comprimento e densidade da rede de drenagem ( $Dd$ )

$$Dd = \frac{Cdren}{A} \quad (05)$$

$$Cdren = \sum_i^n Lci \quad (06)$$

Em que:

$Cdren$ : densidade de drenagem ( $\text{km.km}^{-2}$ );

$Dd$ : densidade de drenagem ( $\text{km.km}^{-2}$ );

$Lci$ : comprimento do  $i$ -ésimo curso (km);

$A$ : área da bacia ( $\text{km}^2$ ).

- Comprimento e declividade do curso principal ( $Dcp$ )

$$Dcp = \left( \frac{h_N - h_F}{Lb} \right) \times 100 \quad (07)$$



Em que:

$D_{cp}$  : declividade média da bacia, %;

$h_N$  : cota da nascente do curso principal, m;

$h_F$ : cota a 90% do comprimento do curso principal, partindo da nascente, m;

$L_b$ : Comprimento da curso principal, m.

- Declividade média da bacia ( $D_b$ )

$$D_b = \left( \frac{h_{85\%N} - h_{10\%F}}{0,75 \times L_{cp}} \right) \times 100 \quad (08)$$

Em que:

$D_b$  : declividade média da bacia (%);

$H_{85\%N}$  : cota a 85% do comprimento do curso principal, partindo da nascente (m);

$h_{10\%F}$ : cota a 90% do comprimento do curso principal, partindo da nascente (m);

$L_{cp}$ : Comprimento do curso principal (m).

Observa-se que na determinação da  $D_b$ , 15 % do seu curso partindo da nascente e 10 % antes de chegar à sua foz não foram considerados por serem regiões extremas, sendo na primeira a declividade muito acentuada e na outra, ao contrário, praticamente nula. Assim, tais regiões proporcionariam uma medida distorcida da real declividade da bacia.

- Fator de forma da bacia

$$R_f = \frac{A}{L_b^2} \quad (09)$$

Em que:

$R_f$ : relação de forma da bacia, adimensional;

$A$ : Área da bacia, km<sup>2</sup>;

$L_b$ : Comprimento da bacia, km;

Quanto mais próximo da unidade o fator de forma ( $R_f$ ), mais quadrada é a forma da bacia. Formas retangulares são observadas em valores afastados da unidade.

- Coeficiente de compacidade

$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (10)$$

Em que:

$K_c$ : coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius da bacia, adimensional;

$P$ : perímetro da bacia, km;

$A$ : área da bacia, km<sup>2</sup>;

O coeficiente de compacidade é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente de seu tamanho; quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo igual a unidade corresponderia a uma bacia circular. Se os outros fatores forem iguais, a tendência para maiores enchentes é tanto mais acentuada quanto mais próximo da unidade for o valor desse coeficiente (VILLELA; MATTOS, 1975).

- Sinuosidade do rio principal

$$Sin = \frac{Lcp}{Lt} \quad (11)$$

Em que:

$Sin$ : Sinuosidade do curso principal, adimensional;

$Lcp$ : comprimento do curso principal, km;

$Lt$ : comprimento do talvegue, km;

A sinuosidade do curso principal é um fator controlador da velocidade de escoamento. A condição para que não exista sinuosidade do curso principal é o valor correspondente a unidade.

- Tempo de concentração da bacia (segundo Corps of Engineers)

$$Tc = 0,191 \times Lcp^{0,5} \times Db^{-0,19} \quad (12)$$

Em que:

$Tc$ : Tempo de concentração, h;

$Lcp$ : comprimento do curso principal, km;

$Db$ : declividade da bacia, %;

Utilizou-se a equação acima citada, como a mais indicada por Silveira (2005) para bacias de até 12.000 km<sup>2</sup>.

- Extensão média do escoamento superficial

$$Ext_{runoff} = \frac{A}{4 \times Lcp} \quad (13)$$

Em que:

$Ext_{runoff}$ : Extensão média do escoamento superficial, km;

A: área da bacia, km<sup>2</sup>;

*L<sub>cp</sub>*: comprimento do curso principal, km;

- Perfil longitudinal do curso principal

Para determinação do perfil longitudinal do curso principal utiliza-se no eixo X a distância da nascente ao exultório e eixo Y as cotas obtidas a cada 500 m ao longo do rio principal com o valor respectivo na grade SRTM e através da observação e interpolação linear da distância da cota ao ponto no espaço homólogo do respectivo curso principal da carta DSG/ SUDENE

- Hipsometria dos dados SRTM

O mapa hipsométrico para as meso-bacias foi elaborado a partir do MDEHC das meso-bacias através da ferramenta de análise espacial de superfície (*Spatial Analyst/ surface*) da plataforma Arcgis. Cria-se uma lista de contornos (curvas de nível) com valores idênticos às curvas eqüidistantes presentes na bacia de acordo com as cartas DSG/ SUDENE.

Para cálculo da área, transforma-se a linha em polígono e a partir da ferramenta XTOOLS do Arcgis obteve-se a área correspondente ao intervalo de cada curva de nível para posterior comparação com as áreas geradas a partir das cartas DSG/ SUDENE.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Validação dos dados SRTM

Os resultados obtidos por meio da Análise de Variância (ANOVA) indicam em relação à variação altimétrica dos dados SRTM e RNs que pelo menos uma das alturas de vegetação (Tabela 3) apresenta diferença na influência das mesmas na precisão dos dados SRTM. A avaliação de 1233 pontos presentes na bacia apresentou ainda um erro médio de 7m, referente aos dados SRTM e IBGE, (Tabela 7) tendo sido inferior ao encontrado por Miliareisis e Paraschou (2004) na Ilha de Creta na Grécia, onde topografia bem acidentada e vegetação nos vales de porte alto contribuíram ao erro médio dos dados SRTM entre 19 e 25m.

TABELA 7 – ANOVA dos erros observados por influência da altura da vegetação referente aos dados SRTM e RNs do IBGE.

Causas de variação	gl	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Altura da vegetação	3	4214,30	1404,76	13,70	0,00001
Erro altimétrico	1229	125975,32	102,50		
Total corrigido	1232	130189,62			
Média geral = 7,74			N=1233		

gl: Graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrados médios; F: Teste de Fisher; Pr > Fc: probabilidade.

A precisão vertical dos dados SRTM varia segundo Gesch et al. (1999) em torno de 16m, a um nível de confiança de 90%.

De acordo com Toutin (2002) um erro vertical entre 12 e 20m é um consenso na precisão MDE extraído a partir de um Radar de Abertura Sintética (SAR).

Bourgine e Baghdadi (2005) avaliando dados SRTM da banda-C em uma área com floresta densa na Guiana Francesa observou uma acurácia de aproximadamente 10m. O erro altimétrico ao nível de confiança de 90 % é cerca de 16m. Consideram ainda a variação vertical dos dados devido à influência das alturas das árvores, bem como uma ligeira penetração o sinal de radar na banda-C. Segundo os autores, elevações são subestimadas pela SRTM nas encostas e são superestimadas em direção oposta às encostas.

CCRS (2006) comparando as técnicas de interferometria com estereoscopia no cálculo de altitude observou uma maior acurácia dos dados altimétricos com uso de radares interferométrico. Heipke et al. (2002), estimam erros verticais de aproximadamente 6 m nos

dados SRTM. As diferenças verificadas por Barros et al. (2005) apresentaram-se pequenas: sempre menores ou iguais a 20 m, com média de 7,5 m entre 4 pontos avaliados.

Já Rao (2004), em experimentos de campo, encontrou erros menores que 5 m na vertical e de 2 a 3 pixels na horizontal, o que chama a atenção para a necessidade de validação também para deslocamentos dos dados.

A Figura 18 exibe a diferença entre as médias pelo teste de Tukey da variação altimétrica com diferença mínima significativa (DMS) igual a 3,1 m. O erro padrão igual a 0,9 m aumenta a confiança em torno da estimativa da média. Em todas as alturas de vegetação os valores médios do erro foram superiores à altura do dossel. A altura média da vegetação de 6,0 m apresentou diferenças significativas sobre os outros dosséis. Assim a vegetação de maior porte contribui mais significativamente para os erros altimétricos da SRTM.

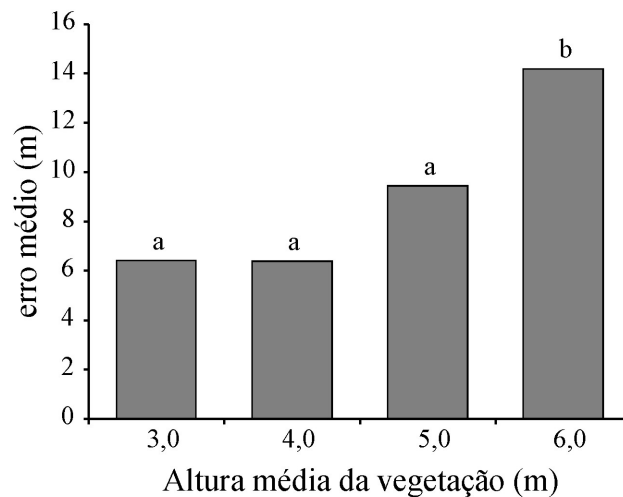


FIGURA 18 - Comparação entre os erros médios em decorrência da altura da vegetação através do teste de Tukey (95% de probabilidade).

Com relação às classes de vegetação (Tabela 3), os resultados obtidos por meio da Análise de Variância (ANOVA) reforçam a existência de pelo menos uma diferença entre as classes de vegetação (Tabela 8).

TABELA 8 – ANOVA dos erros observados por influência da vegetação referente aos dados SRTM e RNs do IBGE.

Causas de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Classe de vegetação	8	5302,57	662,82	6,49	0,00001
Erro altimétrico	1224	124887,05	102,03		
Total corrigido	1232	130189,62			
Média geral = 7,74				N=1233	

gl: Graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrados médios; F: Teste de Fisher; Pr > Fc: probabilidade.

A Figura 19 exibe a diferença entre as médias da variação altimétrica com diferença mínima significativa (DMS) igual a 6,2 m e erro padrão igual a 1,4 m. A classe de vegetação Matas Úmidas apresentou diferença significativa em relação às demais. Por ser tratar de uma vegetação de maior porte e em regiões com maior altitude e com relevo irregular, o dossel denso das árvores encobre as irregularidades do relevo.

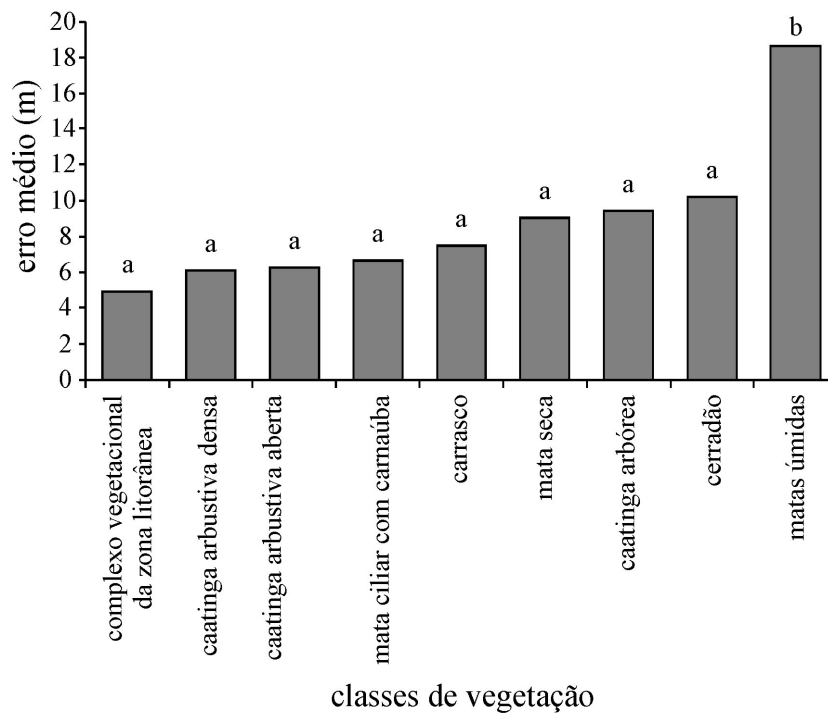


FIGURA 19 - Comparação entre os erros médios em decorrência da classe de vegetação através do teste de Tukey (95% de probabilidade).

A ocorrência da classe de vegetação matas úmidas se dá, especificamente no extremo sul do estado do Ceará, local de umidade alta, principalmente nos primeiros meses do ano, o que coincide com o período da passagem do satélite. Isso ocasiona fontes de erro devido à altura e densidade da vegetação e umidade do solo. Segundo Dallemand et al. (1991) as fontes de erros do radar interferométrico são oriundas do retorno do sinal é a soma dos dois efeitos: altura da vegetação e umidade do solo, caracterizando a influência relativa da superfície dos alvos na qualidade do sinal.

#### 4.1.1 Análise do erro dos dados SRTM

Para um total de 1233 observações, a relação entre os dados SRTM e as RNs do IBGE apresentam, conforme a Figura 20, uma curva de tendência linear com adequação de 99,61% dos pontos a este ajuste, um coeficiente angular muito próximo de um, e com um

coeficiente linear equivalente a 2,2219 m. Estes valores podem corresponder a um erro “*offset*” de interferência do radar conforme ressalta Jarvis et al. (2004) e Gesch (2005).

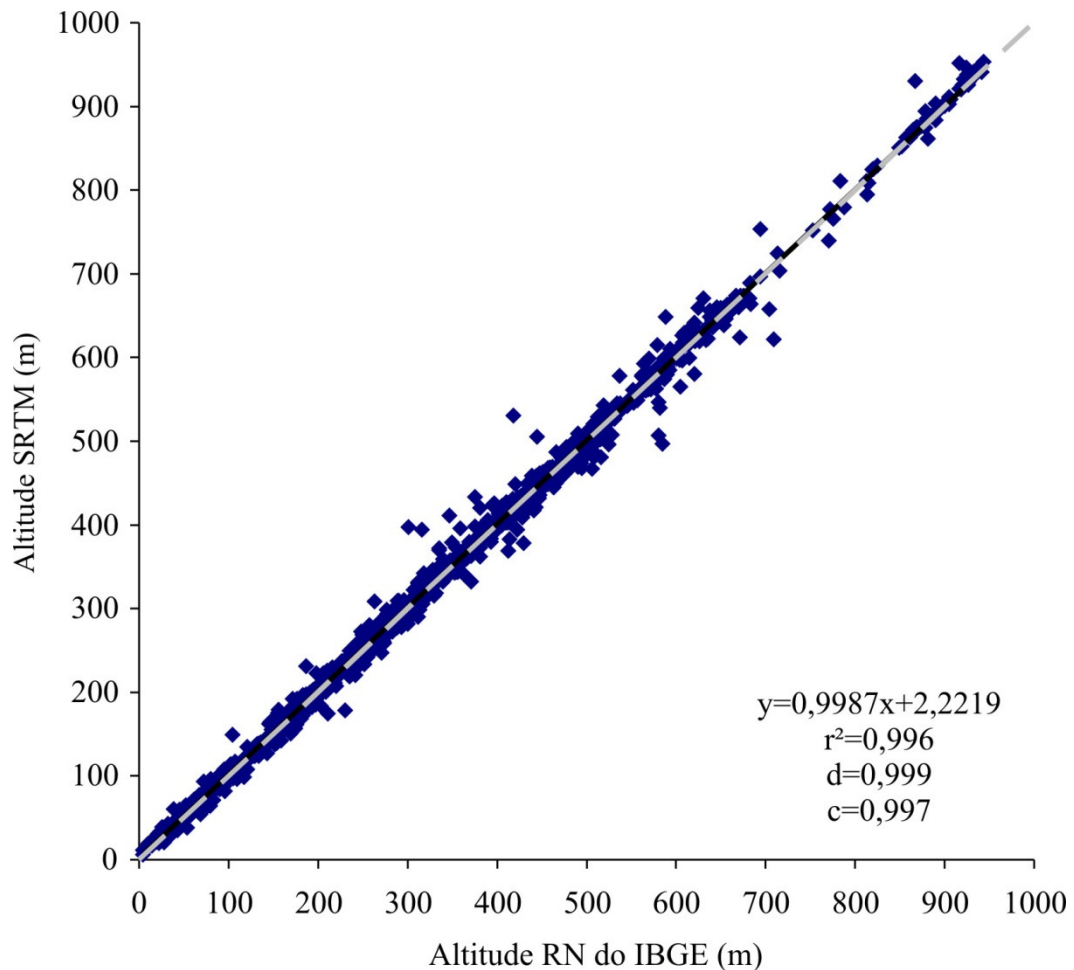


FIGURA 20 - Relação entre dados do SRTM e altitudes obtidas nos RNs para a Bacia do Jaguaribe.

De acordo com as especificações da missão SRTM, os modelos digitais de elevação foram produzidos com uma precisão vertical de 16m, com 90% de certeza (RABUS et al., 2003). Os resultados obtidos neste trabalho com precisão vertical em torno de 7,7 m (Tabela 8) estão abaixo dos valores de variação propostos na missão por RADAR interferométrico. Santos et al. (2006) em estudos na Amazônia, predominantemente composta por árvores de grande porte observaram um *offset* de aproximadamente 16 m.

Valeriano e Abdon (2007) mostram variações altimétricas em torno de 10 m ou menos, compatível com a altura de dosséis vegetais, que afetam a altimetria SRTM. Em estudos de comparação entre os dados SRTM, DGPS e dados das cartas planialtimétricas feitos em condições de vegetação densa e de porte alto na Amazônia por Santos et al. (2006) verificou-se uma variação de aproximadamente 22 m em relação aos dados fornecidos por

cartas planialtimétricas. Rao (2004) observou precisão de 5,0 m na comparação de dados altimétricos na Índia. Miliarensis e Paraschou (2005) realizaram um estudo com dados SRTM, na ilha de Creta, ao sul da Grécia, tendo encontrado o erro altimétrico absoluto ente 19 e 27,5 m.

Os valores de “*offset*” observados na Bacia do Jaguaribe são bem menores que os encontrados por Jarvis et al., (2004) em trabalho desenvolvido na Colômbia, onde apresentaram *offset* de até 107 m. Gesch (2005), nos Estados Unidos, evidenciou a relação linear entre os dados, acrescentando uma identificação de 96% dos dados SRTM em função dos dados referenciais da USGS.

Os dados SRTM na Bacia do Jaguaribe conforme a Figura 21 mostra a tendência dos erros dos dados SRTM em função dos dados das RNs. O pico da curva representa a maior ocorrência de erro próximo ao valor zero. Com a ocorrência de erros com valores extremos variando de -87,5 m a 115 m. Esta variação devem estar associada a resolução espacial dos dados SRTM que podem causar maior variação devido a irregularidades no relevo da Bacia, podendo ainda ser proveniente de áreas alagadas que promovam um ruído no retorno do sinal do RADAR.

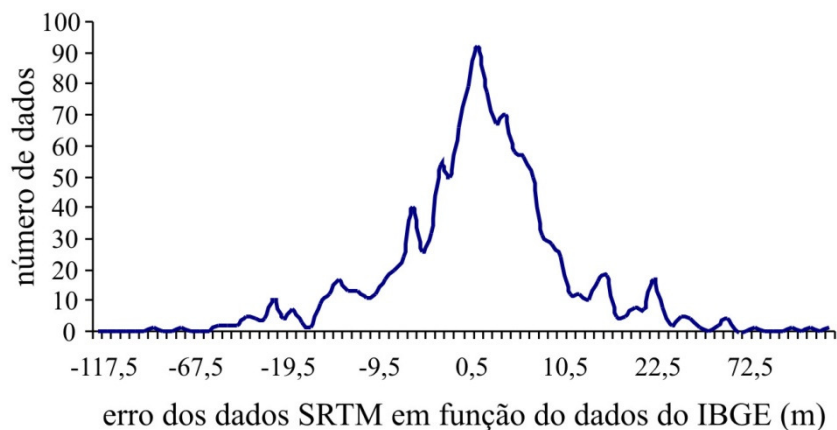


FIGURA 21 - Curva do erro dos dados SRTM em função dos dados das RNs do IBGE.

Assim, os dados SRTM possibilitam uma análise preliminar para utilização no meio científico. Entretanto, não devem ser utilizados como a representação real da superfície terrestre em projetos que visem o planejamento ou execução em obras ou construções sem uma verificação detalhada da área.

A interferência da vegetação é fonte de erro nos dados altimétricos da SRTM. Entretanto, é importante avaliar a relação entre a variação resultante dos dados SRTM e sua respectiva classe de vegetação.



#### 4.1.2 Variação dos dados SRTM x interferência da vegetação

Entre as características indesejáveis do ponto de vista da modelagem topográfica, a sensibilidade a quaisquer objetos presentes sobre a superfície do terreno, tais como antenas, edificações e mesmo variações da cobertura vegetal, dificulta a percepção da superfície do terreno em si. Por outro lado, estudos que envolvam a superfície de dossel podem eventualmente explorar estes dados na análise fisionômica de formações florestais, conservadas as limitações devidas à sua resolução espacial e temporal. Tal potencialidade se apresenta especialmente evidente em terrenos de pequena amplitude altimétrica, onde as variações do modelo devidas à altura de dossel suplantam aquelas advindas do próprio terreno (VALERIANO; ABDON, 2007)

As Figuras 22 a 28 mostram a relação entre os dados SRTM e os respectivos dados homólogos do IBGE, bem como os coeficientes lineares, *offset*, para as variações de altura média e classes da vegetação.

Para as alturas médias de vegetação de 3 e 4 m o *offset* observado é menor que suas respectivas alturas médias (Figuras 22, 23, 24, 25), apresentando boa consistência entre os dados com relação ao tipo de vegetação predominante na caatinga, com pouca densidade de dossel.

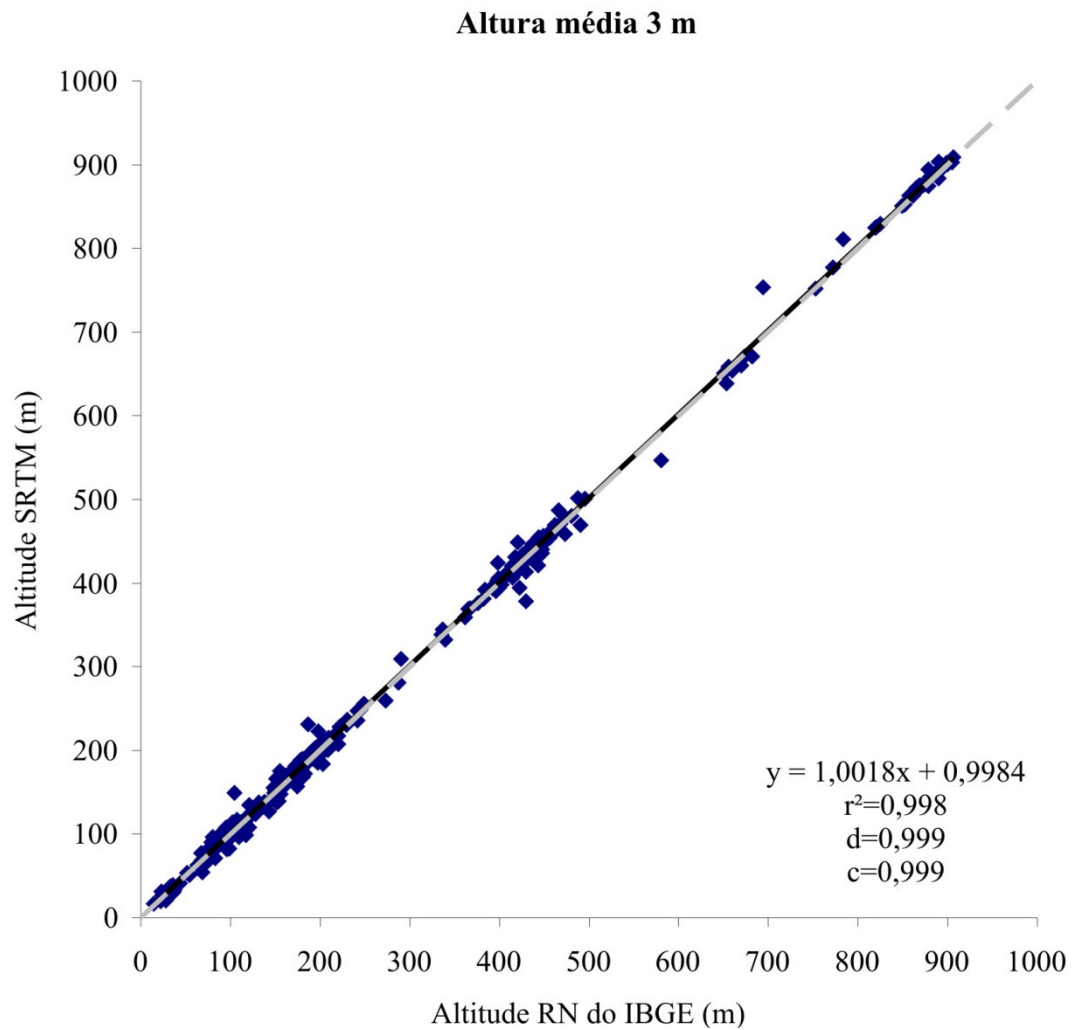


FIGURA 22 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 3 m de altura

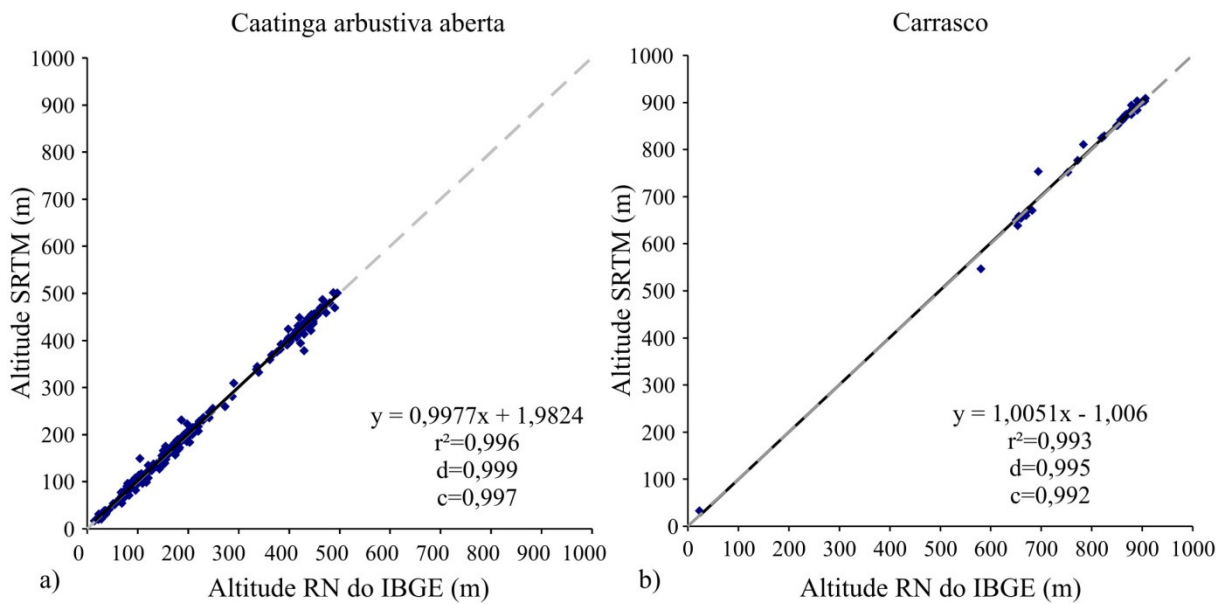


FIGURA 23 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para as classes de vegetação com altura média de 3 m (a – caatinga arbustiva aberta; b – carrasco).

A Figura 24 apresenta a dispersão dos dados SRTM e RNs do IBGE para a altura de vegetação de 4m com os parâmetros de avaliação muito próximos a um. Coeficiente angular também próximo de um e o coeficiente linear (*offset*) em torno de 4m. Apresentando coerência com a altura média classificado por Toniolo e Dantas (1994).

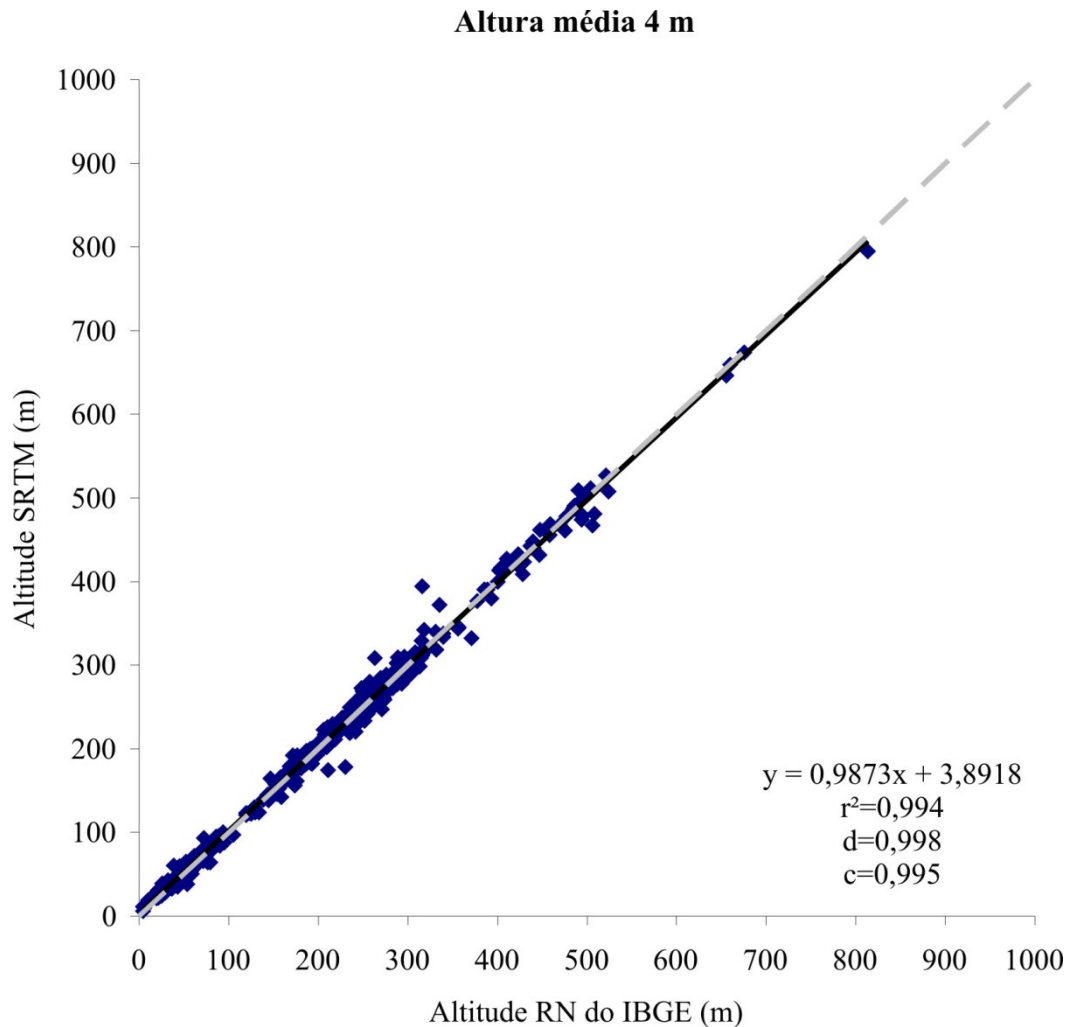


FIGURA 24 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 4 m de altura.

A Figura 25a apresenta um coeficiente linear um pouco menor que a altura média da vegetação. Já as Figuras 25 (b, c) apresentam o valor do coeficiente linear um pouco maior e a Figura 25d, mata seca, apresenta um coeficiente linear com aproximadamente metade da altura a que corresponde. Este fato pode ser atribuído a própria característica da vegetação, espaçada e de baixa densidade (TONIOLO e DANTAS, 1994).

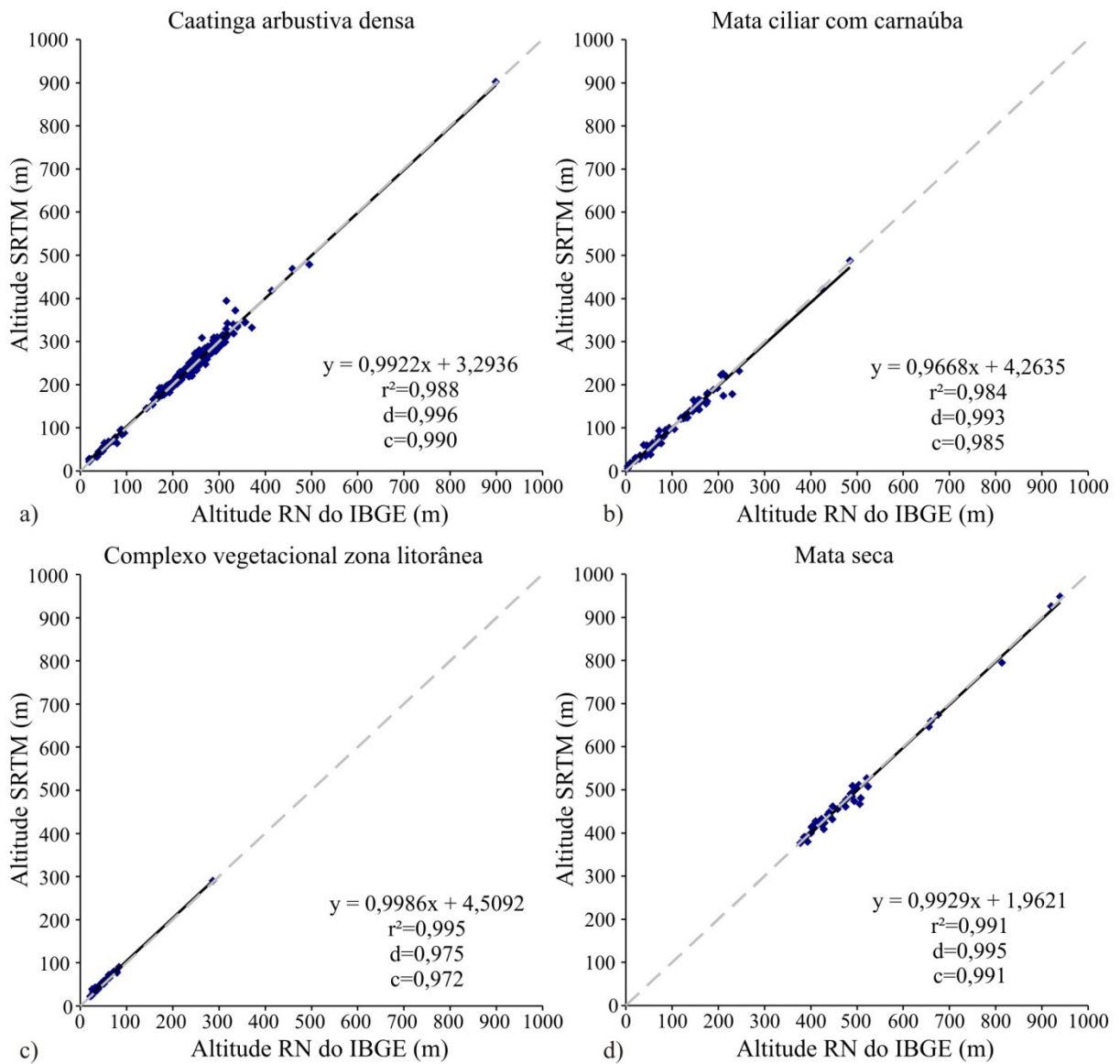


FIGURA 25 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para as classes de vegetação com altura média de 4 m.

A vegetação com altura média de 5,0 m (Figura 26), composta apenas pela caatinga arbórea apresentou um *offset* razoavelmente superior à altura média da vegetação. O gráfico indica a altitude em que este tipo de vegetação tem maior densidade e porte, demonstrando assim a viabilidade dos dados SRTM para mapeamento de espécies vegetais.

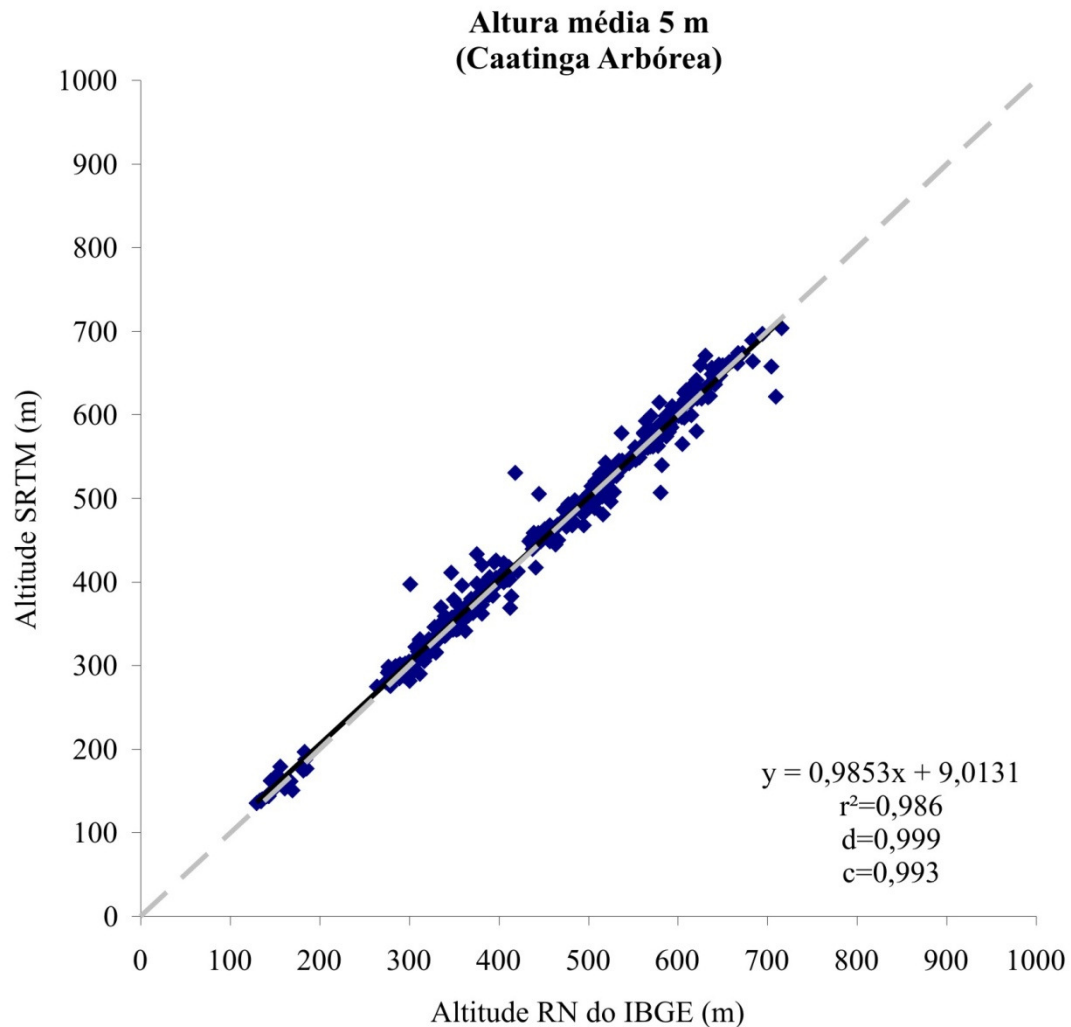


FIGURA 26 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 5 m de altura

As classes de vegetação de cerrado e matas úmidas com altura média de 6,0 m apresentam os maiores *offsets*, bem superiores às outras vegetações classificadas por Toniolo e Dantas (1994) quanto à altura (Figuras 27 e 28). Discrepâncias de erro vertical podem ocorrer em relevos com altas declividades (GESCH, 2005), que é onde predominantemente ocorre este tipo de vegetação na Bacia do Jaguaribe. Além disso, estas classes de vegetação se encontram no extremo sul do Ceará, uma região com razoável ocorrência de chuvas, principalmente nos primeiros meses do ano. Dutra et al. (1986) relaciona o retroespalhamento do sinal à constante dielétrica da vegetação, que é fortemente influenciada pelo conteúdo de umidade. Vigor e estágio de desenvolvimento da vegetação e incidência de chuvas na passagem do RADAR.

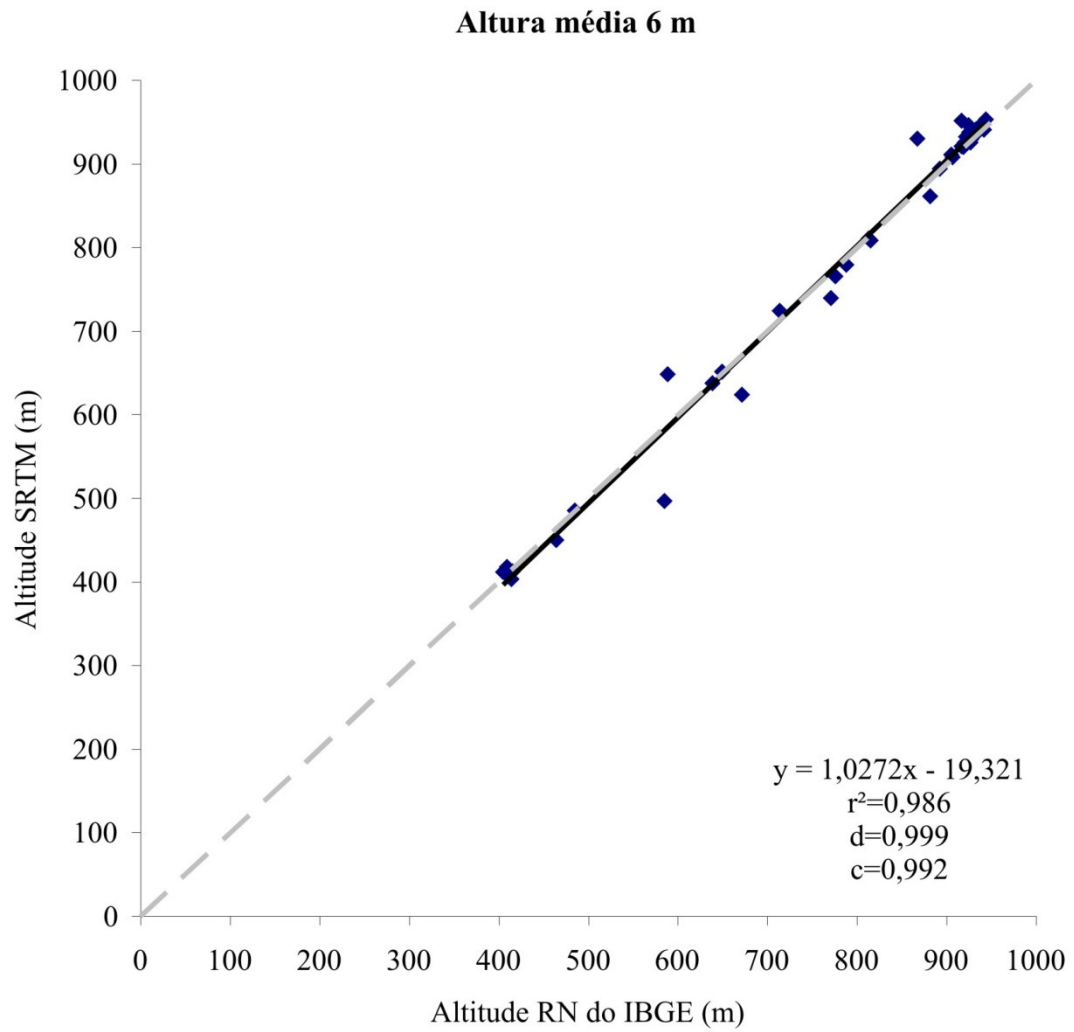


FIGURA 27 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para vegetação com 6 m de altura

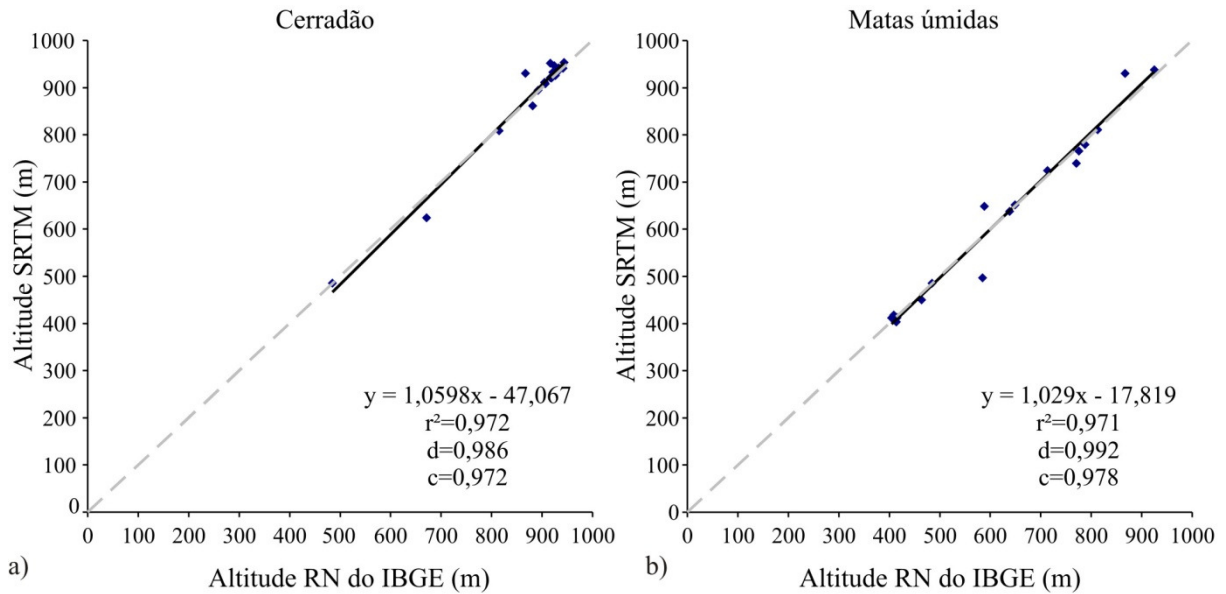


FIGURA 28 - Dispersão dos dados SRTM e RNs para as classes de vegetação com altura média de 6 m.

A altura média da vegetação contribuiu para um *offset* com valores de altitude do SRTM superiores às RNs do IBGE em todas as classes de vegetação correspondentes às alturas de 3, 4 e 5 m, exceto no complexo vegetacional da zona litorânea e mata ciliar com carnaúba. Para a vegetação com altura média de 6 m os dados SRTM resultaram em um *offset* inferior aos valores das RNs. Isso pode ser explicado pela profundidade de penetração da onda de RADAR na vegetação que depende da umidade e densidade da vegetação, assim como do comprimento de onda. Para Dallemand et al. (1991), o espalhamento do volume conta com a habilidade da microonda penetrar em certa cobertura do alvo e retomar sinais da subsuperfície do alvo. Na maioria dos casos, o sinal resultante é a soma dos dois efeitos, em graus variados, dependendo da influência relativa da superfície dos alvos. As classes de vegetação correspondentes à altura de 6,0 m ocorrem somente na região do extremo sul do estado, conhecida como Região do Cariri, onde há precipitação superior a 1.000 mm anuais, com predominância de vegetação exuberante. Só no período da passagem do RADAR nas estações pluviométricas de Barbalha, Crato e Juazeiro do Norte, a precipitação registrada foi de 133 mm, 100 mm e 160 mm, respectivamente. O que corresponde a aproximadamente 15% de toda a chuva anual em apenas 11 dias.

A Tabela 9 mostra o coeficiente de regressão, o coeficiente de correlação, o índice de Willmott e o índice de confiança ou desempenho para análise da confiabilidade os dados SRTM em relação aos RNs do IBGE. Estes mesmos índices estatísticos foram utilizados com

êxito em avaliações de dados meteorológicas (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) (EVANGELISTA; PEREIRA, 2003) (DORNELAS; SILVA; PEREIRA, 2006) e de qualidade de água por Rodrigues et al. (2007). Seguindo a mesma avaliação utilizada pelos autores acima citados, os resultados indicam um ótimo desempenho para todas as classes de vegetação bem como para a avaliação segmentada da altura da vegetação. O que, apesar de representarem uma boa base de dados na escala 1:100.000, não devem ser classificados como tal, já que são áreas distintas, avaliações e interpretações diferentes para um mesmo índice. Classificar os dados SRTM como ótimo significa desconsiderar todas as suas limitações quanto a resolução e interferência da vegetação. Assim, pode-se utilizar estes índices com outra ponderação tornando-se necessária a observação ao atendimento do Padrão de Exatidão Cartográfico.

TABELA 9 – Análise da confiança dos dados SRTM em função da interferência da vegetação presente na Bacia do Jaguaribe

	Categoria de vegetação	$r^2$	$r$	$d$	$c$
classe de vegetação	arbustiva aberta	0,996	0,998	0,999	0,997
	arbustiva densa	0,988	0,994	0,996	0,990
	carrasco	0,993	0,997	0,995	0,992
	zona litorânea	0,995	0,997	0,975	0,972
	caatinga arbórea	0,986	0,993	0,996	0,989
	mata ciliar com carnaúba	0,984	0,992	0,993	0,985
	mata seca	0,991	0,996	0,995	0,991
	cerradão	0,972	0,986	0,986	0,972
	matas úmidas	0,971	0,986	0,992	0,978
altura da vegetação	3 m	0,998	0,999	0,999	0,999
	4 m	0,994	0,997	0,998	0,995
	5 m	0,986	0,993	0,999	0,993
	6 m	0,986	0,993	0,999	0,992

$r^2$ : coeficiente de regressão;  $r$ : coeficiente de correlação;  $d$ : índice de Willmott;  $c$ : índice de confiança ou desempenho; \* desempenho ótimo para  $c > 0,85$

A precisão dos dados SRTM para a bacia do Jaguaribe, dada pelo coeficiente de correlação, em todos os segmentos ficou acima de 0,99. A exatidão obtida através do índice de concordância ou índice de WILLMOTT apresentou bem próxima da concordância perfeita com valores acima de 0,97 em todas as categorias de enquadramento da vegetação.

Principalmente pela dificuldade em gerar um MDE a partir de levantamentos topográficos convencionais os dados da SRTM evidenciam-se como a principal base de dados digitais altimétricos, embora exista a necessidade de uma melhor resolução espacial, possibilitando a utilização dos mesmos em maiores escalas.



Para atendimento ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC (Tabela 4) (BRASIL, 1984) foi avaliado o erro altimétrico (dados SRTM vs RNs) em função da altura média e classes de vegetação, com seu respectivo enquadrado em categorias de tolerância ao erro médio quadrático e tolerância vertical.

Na Tabela 10 observa-se o enquadramento dos erros avaliados com base na altura da vegetação segundo o critério de atendimento à PEC através do Erro Médio Quadrático (EMQ) e o resumo estatístico dos dados.

TABELA 10 – Análise do erro médio quadrado dos pontos do IBGE e SRTM para a bacia do Jaguaribe em função das alturas médias (m)

Altura da vegetação	PEC	EMQ	média	erro padrão	desvio padrão	mínimo	máximo	N
3 m	A	9,9	6,4	0,4	7,6	0,0	59,4	295
4 m	A	12,1	6,4	0,3	7,3	0,0	78,0	458
5 m	B	15,4	9,4	0,5	12,2	0,0	112,6	442
6 m	não atende	24,1	14,1	3,2	19,8	0,3	87,7	38

Os erros identificados referentes aos três e quatro metros de altura da vegetação foram enquadrados na categoria A do PEC, representando, em relação ao EMQ, boa representatividade dos dados SRTM. Os erros pertinentes à vegetação com cinco metros de altura só atenderam à categoria B do PEC. Isso evidencia a influência da vegetação na precisão vertical dos dados da missão, reafirmando a importância da localização da área de estudo na aplicação destes. A altura da vegetação com seis metros não possibilitou o enquadramento das variações altimétricas em nenhuma das categorias do Padrão de Exatidão Cartográfica. O erro padrão nas alturas de vegetação de três, quatro e cinco metros foi em torno de 0,5 m, representando uma boa estimativa da média. Entretanto, para a vegetação com seis metros de altura o erro padrão igual a 3,2 m representa possíveis inconsistências na estimativa da média.

Como o enquadramento em categorias do Padrão de Exatidão Cartográfica depende não só do erro médio quadrático como também da tolerância vertical, deve-se considerar os dois critérios separadamente e escolher o mais rigoroso no enquadramento dos dados de estudo nas categorias do PEC. A avaliação do segundo critério, que é a tolerância vertical em pelo menos 90% dos dados estudados é explicitado na Figura 29. Segundo este critério, apenas os dados provenientes da altura da vegetação igual a seis metros não se enquadram na categoria A, bem como em nenhuma outra categoria, evidenciando a influência desta classe de vegetação na precisão dos dados da banda C provenientes do SRTM.

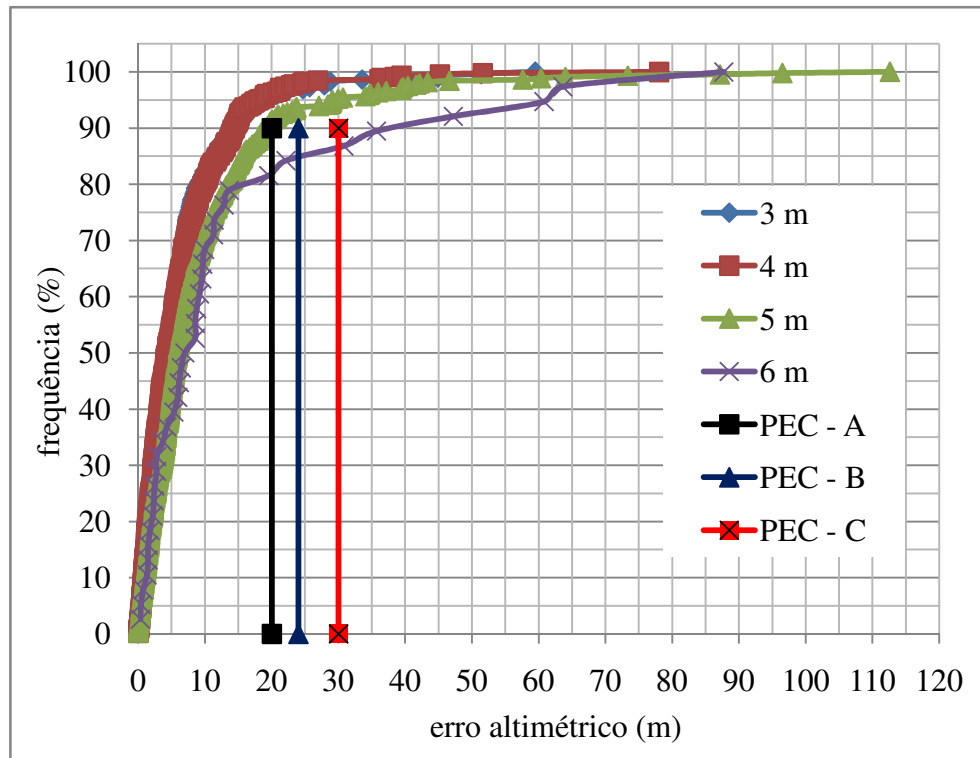


FIGURA 29 - Frequência dos erros dos dados SRTM e enquadramento no PEC para a vegetação com altura igual a 4 m.

Assim, prevalece o critério mais restritivo, que nesse caso é em função da tolerância do erro médio quadrado, resultando em enquadramento na categoria A, as alturas de vegetação com três e quatro metros; na categoria B, altura da vegetação com cinco metros e sem enquadramento: seis metros de altura. Por se tratar de uma área relativamente pequena e com poucos pontos amostrais, a vegetação com altura média igual a seis metros pode apresentar melhor representatividade e precisão quando forem realizados estudos de comparação altimétrica com um maior número de pontos amostrais. Alguns autores, como Rao (2004) e Pinheiro (2006), utilizaram mais de mil pontos de controle para estimativa do erro altimétrico dos dados SRTM e obtiveram resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho quanto a precisão dos dados SRTM

Com o desmembramento da análise das alturas de vegetação para classes de vegetação proposta por Toniolo e Dantas (1994) obtém-se a interferência de cada classe da vegetação na variação altimétrica dos dados SRTM. Assim, a Tabela 11 mostra o enquadramento dos erros avaliados com base nas classes de vegetação (Toniolo e Dantas, 1994) segundo o critério de atendimento ao PEC através do EMQ e o resumo estatístico dos mesmos. Os dados indicam que caatinga arbórea e cerradão enquadram-se, segundo este

critério, na categoria B do PEC. A classe de vegetação matas úmidas não atende a nenhuma categoria do Padrão de Exatidão Cartográfica, portanto, deve-se aprofundar estudos com essa classe de vegetação. A região de ocorrência das matas úmidas se restringe, segundo a classificação proposta por SEPLAN (1994), à região da Chapada do Araripe, sendo esse um local adequado para se investigar, mais detalhadamente, a influência dos fatores associados a fontes de erros dos dados SRTM.

TABELA 11 – Análise do erro médio quadrado dos pontos do IBGE e SRTM para a bacia do Jaguaribe em função das classes de vegetação.

Classes de vegetação	PEC	EMQ	Média	erro padrão	desvio padrão	Extremos		N
						mín	máx	
Caatinga Arbustiva Aberta	A	9,3	6,2	0,4	6,9	0,0	44,8	256
Caatinga Arbustiva Densa	A	9,4	6,1	0,4	7,2	0,0	78,0	312
Carrasco	A	5,1	7,5	1,7	10,9	0,2	59,4	39
Zona Litorânea	A	6,1	4,9	0,7	3,7	0,4	13,2	23
Caatinga Arbórea	B	15,4	9,4	0,5	12,2	0,0	112,6	442
Mata Ciliar com Carnaúba	A	10,3	6,6	0,8	7,9	0,0	51,6	83
Mata Seca	A	12,2	9,0	1,3	8,4	0,1	39,4	40
Cerradão	B	15,7	10,2	2,7	12,2	0,3	47,2	20
Matas Úmidas	não atende	20,6	18,6	6,0	25,4	0,3	87,6	18

Atenderam à categoria A do PEC, com EMQ como critério de enquadramento, as classes de vegetação: caatinga arbustiva aberta, caatinga arbustiva densa, carrasco, zona litorânea, mata ciliar com carnaúba e mata seca. O erro padrão estimado variou de 0,4 m a 6,0 m. Entretanto, observa-se que para todas as classes de vegetação com mais de 50 pontos observados, exceto a zona litorânea, que apesar de dispor de apenas 23 pontos, apresentou um erro padrão igual ou menor que um metro. As classes que apresentam erro médio superior a um, têm amostragem abaixo de 50 pontos. Isso pode influir na estimativa deste parâmetro estatístico na avaliação dos dados SRTM.

Utilizando a tolerância vertical como segundo critério de enquadramento do Padrão de Exatidão Cartográfica, obtiveram-se como resultados dos dados SRTM a não inclusão do cerradão nas categorias do PEC e o enquadramento de matas úmidas na categoria B. Diferentemente do resultado do primeiro critério de enquadramento, que usa o erro médio quadrático como parâmetro de inclusão na categoria, a vegetação caatinga arbórea foi agora enquadrada na categoria A, assim como as classes caatinga arbustiva aberta, caatinga

arbustiva densa, carrasco, complexo vegetacional zona litorânea, mata ciliar com carnaúba e mata seca (Figura 30)

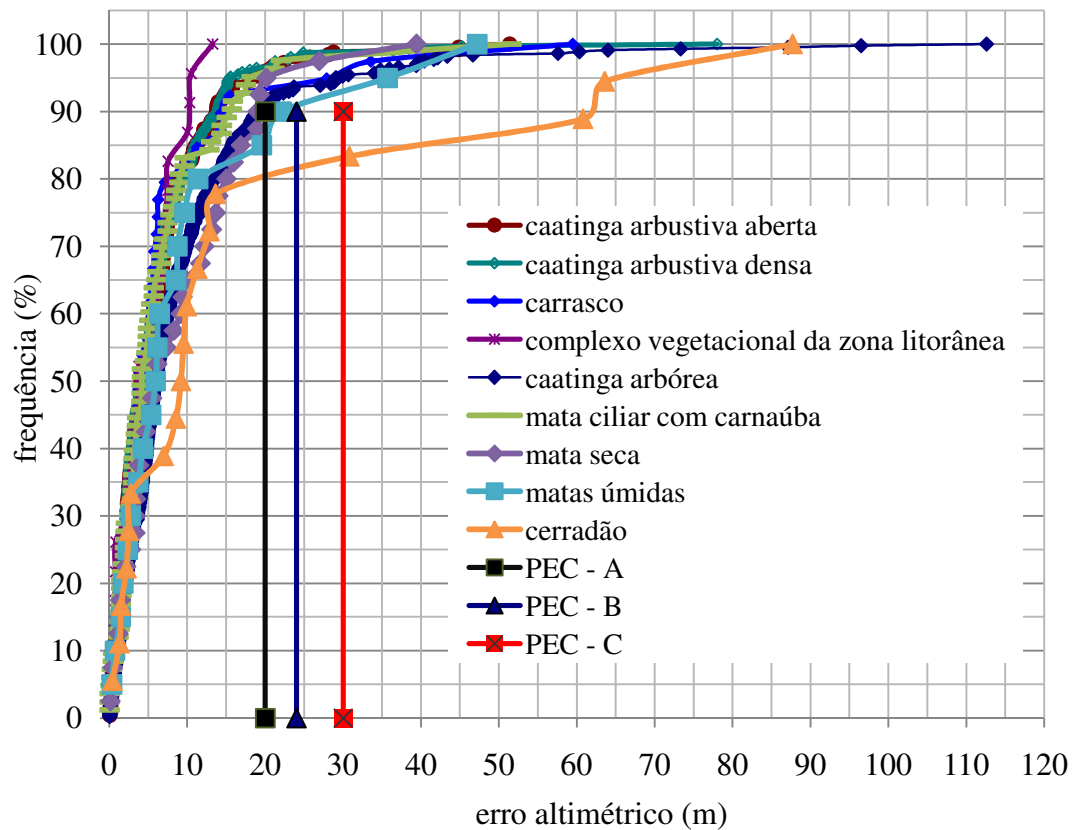


FIGURA 30 - Curva do erro dos dados SRTM em função dos dados das RNs do IBGE.

#### 4.1.3 Comparação dos dados SRTM com dados DGPS em relevo plano

De acordo com Prates (2004), o posicionamento absoluto estático é adquirido pela média das coordenadas registradas para o conjunto de distâncias medidas em cada instante. A incerteza do posicionamento absoluto médio pode atingir cerca de metade da incerteza de um posicionamento com apenas um dado emitido pelo satélite. Assim é fundamental a observação do tempo de permanência do receptor, a fim de se obter um levantamento de dados mais consistente.

Os valores de EMQ (Tabela 12) para a área com relevo plano e vegetação de baixo porte (1,80 m), como se esperava, foram reduzidos em relação a valores encontrados em trabalhos realizados em região com o relevo variado e forte influência da vegetação. Santos et al. (2006) estimaram EMQ em torno de 7 m para dados levantados na Amazônia. Para os Estados Unidos, Gesch (2005), estimou em 3,53 m o EMQ a partir de 13000 pontos de GPS diferencial distribuídos por todo o país. Com um erro médio de 1,64 m, precisão muito

próxima do padrão sub-métrico, os dados SRTM mostram-se bastantes confiáveis e perfeitamente dentro da categoria A do Padrão de Exatidão Cartográfica. Entretanto, Rao

(2004) ao comparar dados altimétricos adquiridos com GPS e SRTM na Índia, em um relevo um pouco mais acidentado obteve uma acurácia dos dados em torno de 5 m.

TABELA 12 – Análise do erro médio quadrado dos pontos de DGPS e SRTM

Variação	EMQ	PEC	erro padrão	média	desvio padrão	mínimo	máximo	N
SRTM – DGPS	1,804	A	0,171	1,643	0,764	0,161	2,915	20

Quando comparados com dados de DGPS observa-se que há uma maior ocorrência de diferenças dos dados SRTM (Figura 31) o que significa uma resposta do sinal anterior ao contato com o solo, como a vegetação é muito baixa, pode-se atribuir esta variação a interferência que o sinal do sensor recebe ao longo de seu trajeto.

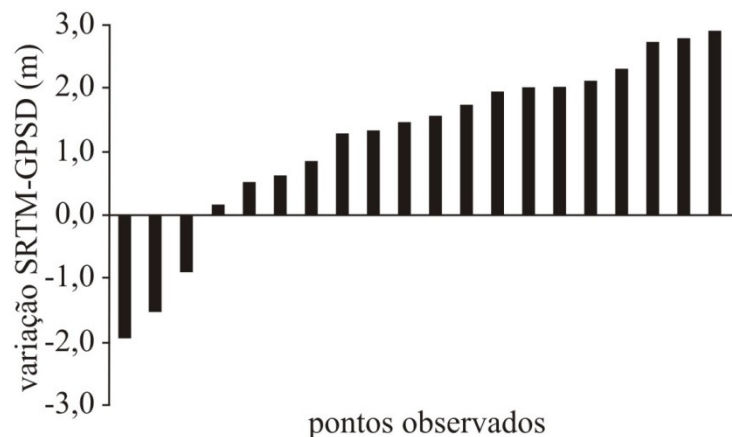


FIGURA 31 - Variação SRTM – DGPS na Chapada do Apodi

Aproximadamente 88% dos dados apresentam-se com maior altitude ortométrica. Apresentando-se semelhante aos dados observados por Pinheiro (2006). Os dados SRTM em áreas planas e com pouca ou nenhuma interferência de vegetação apresentam variações muito pequenas em relação a outros MDE. Sendo, portanto, uma excelente base altimétrica. Segundo Sousa (2005) as correções proporcionadas pelo DGPS acarretam uma melhoria de 90% na precisão. Para se obter uma maior eficácia da técnica DGPS a estação-base foi posicionada nas proximidades da região de interesse (acerca de 200 km), para que haja correlação entre os erros calculados por ela e os erros do receptor (MONICO, 2000).

## 4.2 Dados SRTM/ ArcHydro

### 4.2.1 Análise das características fisiográficas geradas através dos dados SRTM

Anteriormente às bases altimétricas obtidas por sensores remotos, o processo de geração de modelos digitais de elevação requeria, além da digitalização manual de cartas topográficas do IBGE, um pré-processamento minucioso da malha hidrográfica, demandando mão-de-obra e tempo expressivos (MARQUES; SILVA, 2007)

A utilização dos elementos fisiográficos de uma bacia hidrográfica a partir da extensão ArcHydro contribui razoavelmente nas previsões hidrológicas, não só na qualidade do produto gerado pela extensão, mas também pela agilidade, rapidez e economia no levantamento das características físicas de uma bacia hidrográfica. Tucci (2002) enfatiza a importância na redução dos custos e aumento da precisão das estimativas de interesse hidrológico.

Apesar da rotina da extensão ArcHydro seguir uma sequência lógica, tornando-se uma ferramenta útil na determinação das características fisiográficas, um dos passos dessa rotina apresenta uma subjetividade na determinação da quantidade de células necessárias para a geração do início do curso e sua respectiva área de influência. A determinação da acumulação de fluxo (*threshold*) é utilizada por vários autores como um valor atribuído sem um argumento comprovado, simplesmente com uma revisão de literatura que, geralmente, não considera uma base cartográfica oficial, podendo ocasionar erros na caracterização de mal dimensionamento hidrológico.

As Figuras 32, 33 e 34 mostram a variação na densidade de drenagem nas meso-bacias com diferenciação dos cursos gerados a partir dos dados SRTM/ ArcHydro e das cartas DSG/ SUDENE. Observa-se que há uma tendência na mudança da ordem dos cursos. Por ainda não se dispor de um levantamento oficial atualizado da situação da malha hídrica da bacia em estudo, considera-se o levantamento aerofotogramétrico realizado pelo DSG/ SUDENE da década de 70 ainda como a principal fonte de informações fisiográficas de uma meso ou macro escala de trabalho. As Figuras mostram ainda valores superestimados para a acumulação de 25 células e valores sub-estimados das variáveis comprimento e densidade da rede de drenagem nas três meso-bacias (APÊNDICE I). Essa tendência remete a um valor hidrológicamente mais consistente de *threshold* entre 25 e 50 células do grid SRTM para a geração de uma malha de drenagem semelhante à das cartas DSG/ SUDENE. Em estudo feito em uma bacia de macro escala Marques e Silva (2007) constataram que o grau de ramificação da drenagem gerada com 50 células contribuintes é inferior quando comparada à hidrografia

obtida através das cartas planialtimétricas do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (SGE) ou junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

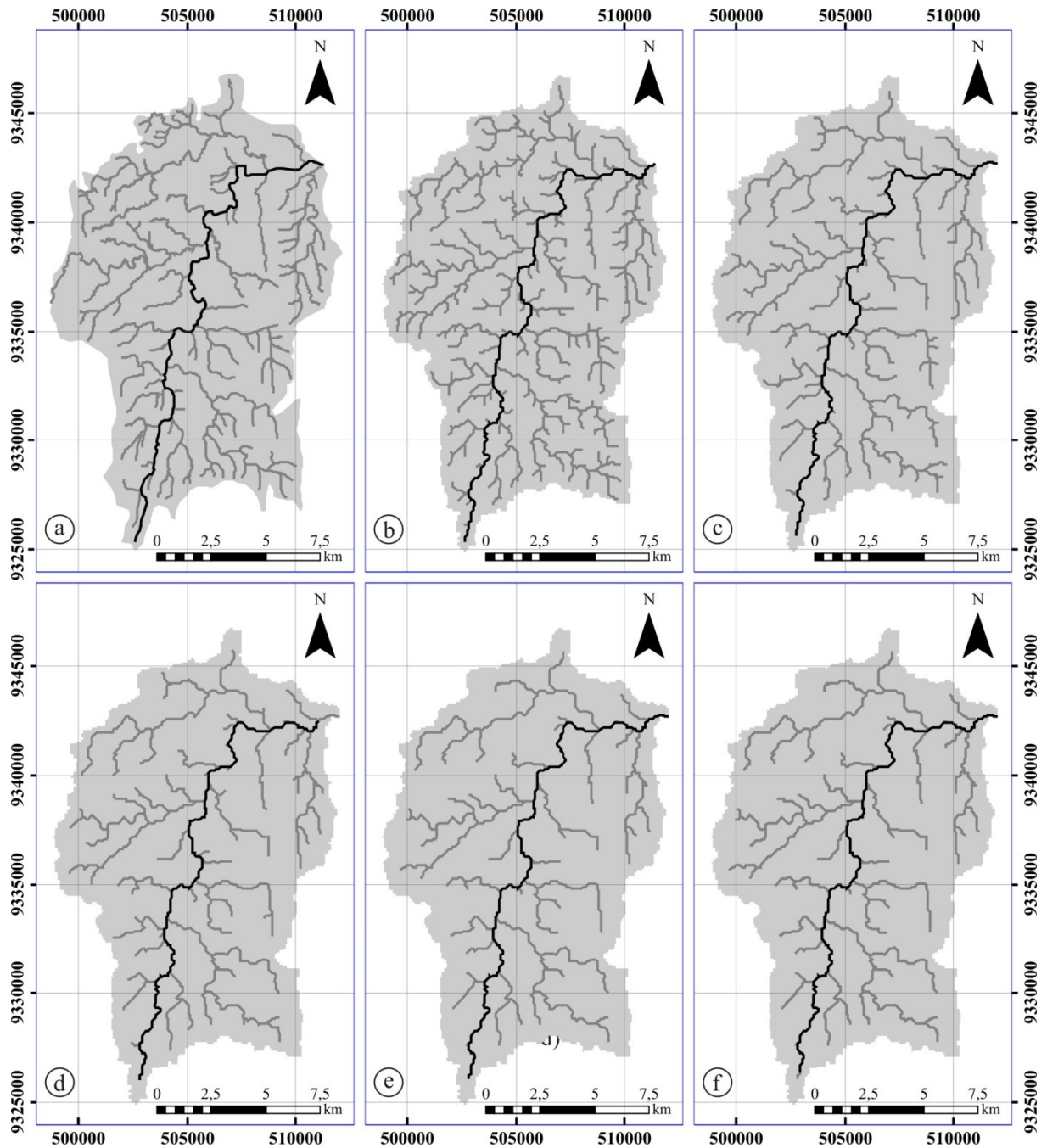


FIGURA 32 - Mapa da drenagem da meso-bacia do açude Nova Floresta. a) drenagem das cartas DSG/ SUDENE, b), c), d), e) e f) delimitação a partir de dados SRTM/ ArcHydro com *threshold* de 25, 50, 75, 100 e 125 células, respectivamente.

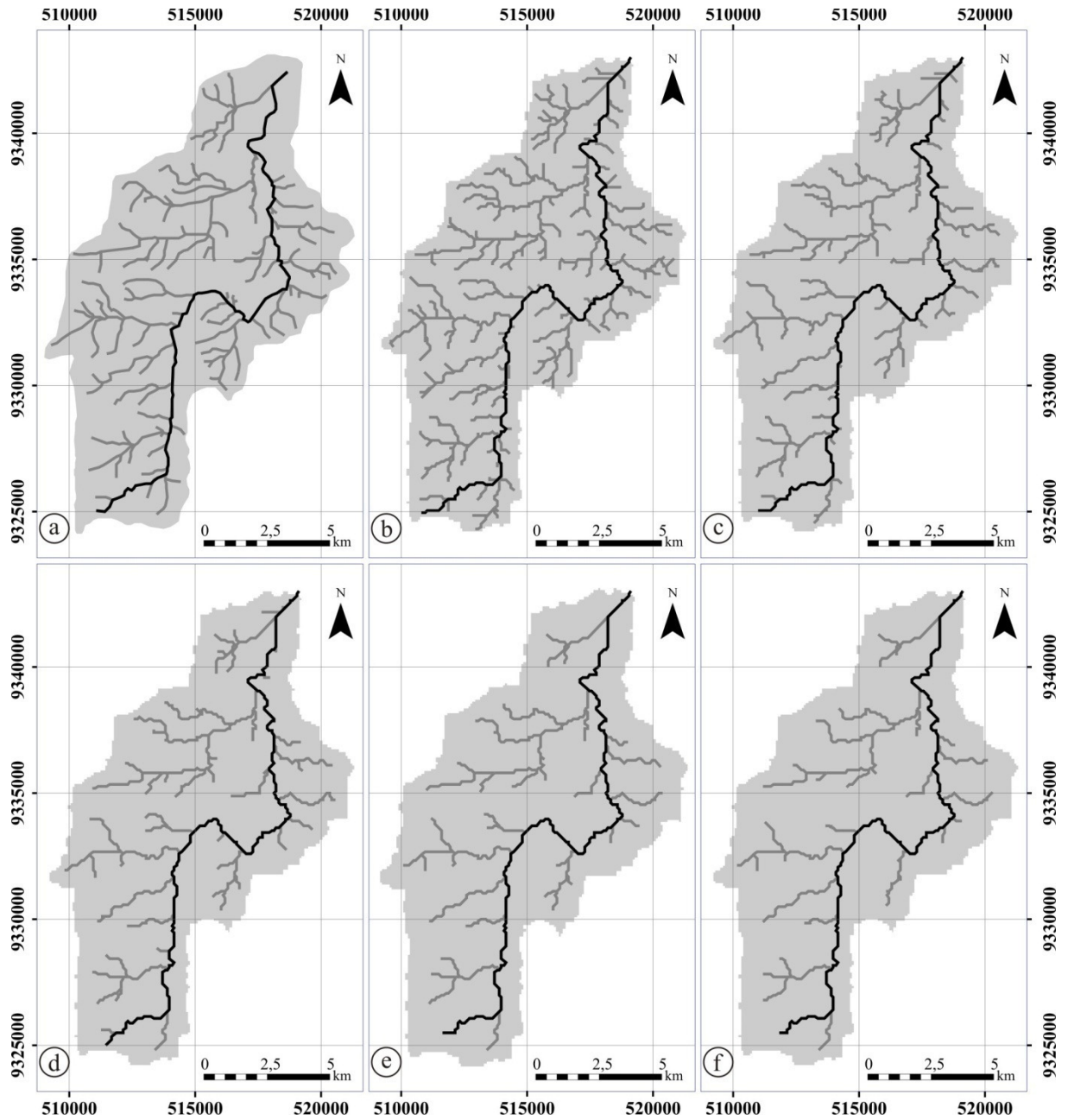


FIGURA 33 - Mapa da drenagem da meso-bacia do Joaquim Távora. a) drenagem das cartas DSG/ SUDENE, b), c), d), e) e f) delimitação a partir de dados SRTM/ ArcHydro com *threshold* de 25, 50, 75, 100 e 125 células, respectivamente.



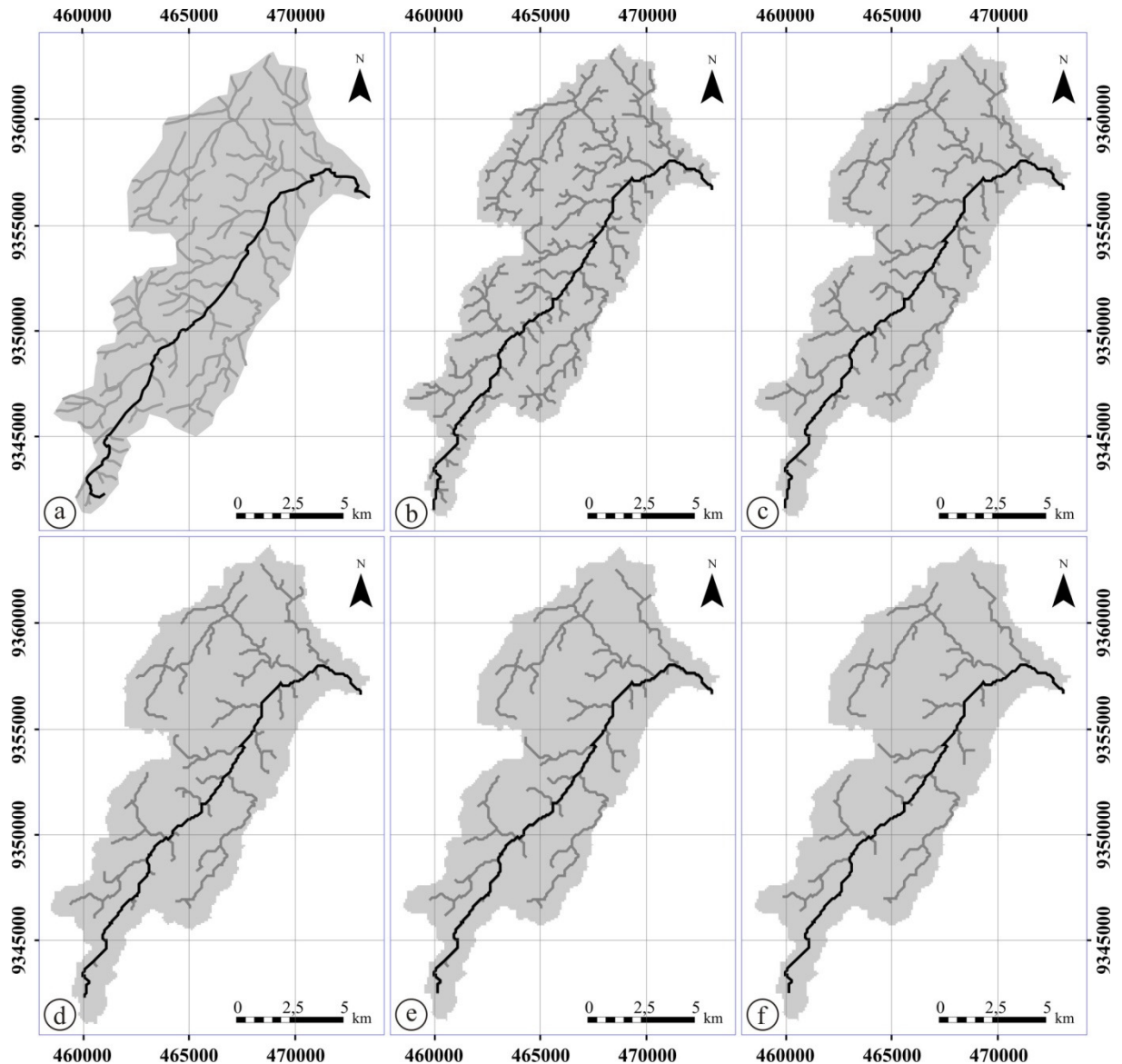


FIGURA 34 - Mapa da drenagem da meso-bacia do Jenipapeiro. a) drenagem das cartas DSG/ SUDENE, b), c), d), e) e f) delimitação a partir de dados SRTM/ ArcHydro com *threshold* de 25, 50, 75, 100 e 125 células, respectivamente.

Marques; Silva (2007) avaliaram a rede de drenagem obtida com 25 células contribuintes e constataram possuir ramificação mais aproximada quando utilizados cartas planialtimétricas na escala de 1:50.000. Menor número de células contribuintes também foram testados na comparação entre os produtos da caracterização fisiográfica derivada dessas cartas, porém, a medida que se ramificou a malha hidrográfica, com a utilização de *threshold* menor, sobrecarregou-se o ambiente de operações, implicando expressiva lentidão aos processos seguintes do algoritmo. Resultados de delimitação automática em uma micro-bacia hidrográfica obtidos por Leão et al. (2004) reafirmam a facilidade que o processo automático

traz em relação à caracterização manual, acrescentando a vantagem de incremento de banco de dados digitalizados. Outros resultados obtidos no estudo de identificação de bacias hidrográficas com características físicas similares no estado do Ceará demonstram que as bacias hidrográficas do Ceará apresentam uma rede de drenagem deficiente, típica de regiões semi-áridas (PORTO et al., 2004). A Tabela 13 traz a variação percentual da caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas analisadas.

TABELA 13 – Variação média percentual da fisiografia (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para as três bacias estudadas

Parâmetro	células contribuintes – <i>threshold</i>				
	25	50	75	100	125
Densidade da rede de drenagem (Dd)	8,87	18,71	33,22	40,52	45,72
Declividade do curso principal (Dcp)	53,40	55,70	57,96	58,26	59,58
Comprimento da bacia (Lb)	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Fator de forma da bacia	1,01	1,01	1,10	1,10	1,10
Coeficiente de compacidade	25,32	23,93	24,08	24,09	24,09
Sinuosidade do rio principal	9,48	9,26	8,14	7,78	7,94
Tempo de concentração da bacia	4,31	9,71	9,71	9,71	9,71
Ext. média do escoamento superficial	16,94	16,94	16,06	15,85	16,11
Altitude máxima	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
Altitude mínima	10,24	10,24	10,24	10,24	10,24
Comprimento do curso principal	10,00	9,77	8,62	8,23	8,37
Área da bacia	0,72	0,41	0,51	0,51	0,51
Comprimento da rede de drenagem	6,78	14,81	26,67	32,41	36,59
Perímetro da bacia	22,05	20,80	20,85	20,86	20,87
Declividade média da bacia	10,83	10,83	10,83	10,83	10,83

O parâmetro declividade do curso principal apresentou maiores variações percentuais devido à interferência de um valor extremo deste parâmetro obtido na bacia do açude Jenipapeiro. Como o início do curso depende do valor do *threshold* e a equação que define este parâmetro considera o valor posicional de maior altitude àquele em que estiver 90 % do curso principal. Assim, as malha de altitudes estão fixas, entretanto o comprimento do curso varia com o *threshold* e a posição relativa sofre um deslocamento, considerando uma posição diferente na obtenção da altitude. As variações no comprimento do curso principal observadas nas três bacias reforçam o entendimento dessa maior variação percentual. Para as bacias Nova Floresta e Joaquim Távora a variação das características foram bem menores, apresentando assim uma melhor conformação da caracterização com o uso da ferramenta de geoprocessamento nestas bacias. O comprimento e a área da bacia foram as variáveis que apresentaram menor variação, representando viabilidade interessante de utilização devido

principalmente à agilidade da extensão ArcHydro e dados SRTM na determinação destes parâmetros.

O parâmetro fator de forma auxilia no entendimento de alguns processos hidrológicos e no comportamento hidrológico da bacia. Segundo Villela; Mattos (1975), uma bacia com este parâmetro baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior. Nas três meso-bacias analisadas foram observadas variações na ordem de um por cento, portanto, de pequena magnitude, além da baixa propensão às enchentes nesta determinação, inclusive apresentando valores menores que 0,5.

A variável, coeficiente de compacidade ( $K_c$ ), assim como o fator de forma avalia a propensão às enchentes. Quanto mais irregular for a bacia, maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo igual à unidade corresponderia a uma bacia aproximadamente circular e, para uma bacia alongada, seu valor é significativamente superior a 1. Uma bacia será mais suscetível a enchentes mais acentuadas quando seu  $K_c$  for mais próximo da unidade. Com valores de  $K_c$  acima de 1,5 as bacias do açude Jenipapeiro, Nova Floresta e Joaquim Távora são representativas de baixa propensão a enchentes.

Os parâmetros, sinuosidade do rio principal, extensão média do escoamento superficial e declividade média da bacia apresentam pequena variação percentual em função da variação dos valores de *threshold*. Estas variáveis para as três meso-bacias em estudo refletiram menos a influência da variação dos valores de acumulação.

Em estudo de comparação de equações para definição de tempo de concentração em bacias na região semi-árida, Silveira (2005) avaliou como a mais indicada e consistente era a equação de Corps of Engineers para dados de bacias de até 12.000 km<sup>2</sup>. Este parâmetro apresentou a mesma tendência de variação da característica comprimento do curso principal, já que a declividade média da bacia pouco apresentou alteração, sendo bem representada e de fácil utilização pela extensão aplicada e com os dados SRTM.

Embora apresente razoável variação nas três meso-bacias, os valores de altitude mínima e máxima (APÊNDICE 1) são pouco representativos em termos hidrológicos devido à resolução espacial dos dados SRTM e à irregularidade do relevo contido na bacia, sendo inclusive, de difícil determinação nas cartas DSG/ SUDENE.

O perfil longitudinal dos rios principais das bacias (Figuras 35, 36 e 37) auxilia na discussão da variação da declividade média do curso principal. Esse perfil gerado a partir dos dados apresenta uma suavização e consistência bem melhor que os valores estimados das cartas DSG/ SUDENE devido à equidistância vertical de 50 m das curvas de nível dessas cartas, tendo que se recorrer à interpolação por valores próximos que nem sempre

possibilitam um bom resultado. Utilizando-se os dados SRTM verificou-se que as três meso-bacias apresentaram resultados mais consistente e praticidade na confecção do perfil longitudinal do curso principal, isso devido à calha bem definida do rio, com os menores valores ao longo da bacia. Para as cartas, a equidistância acima mencionada promove erros pontuais na consideração da altitude relativa ao comprimento do rio.

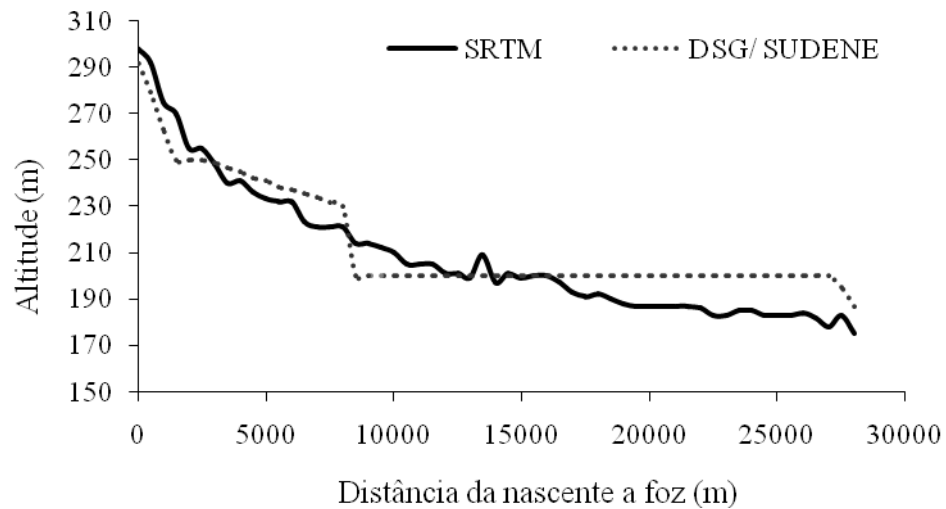


FIGURA 35 - Perfil longitudinal do curso principal da meso-bacia Nova Floresta.

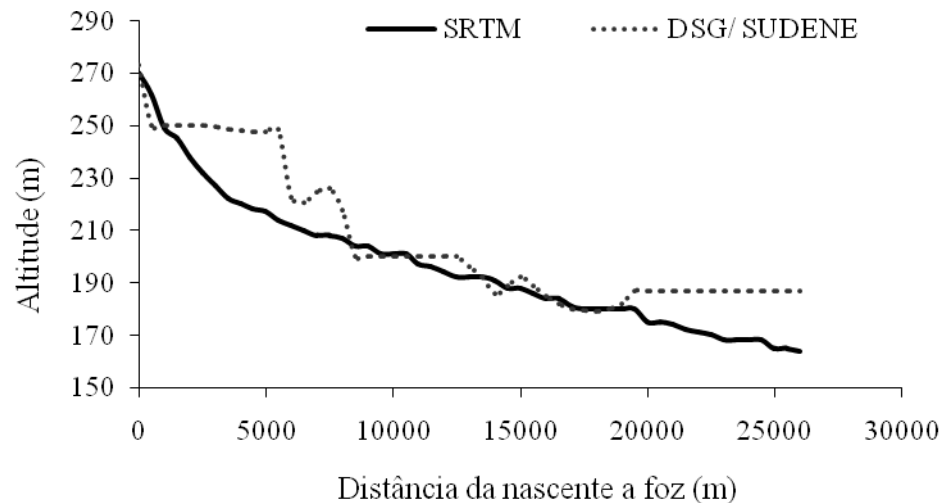


FIGURA 36 - Perfil longitudinal do curso principal da meso-bacia Joaquim Távora

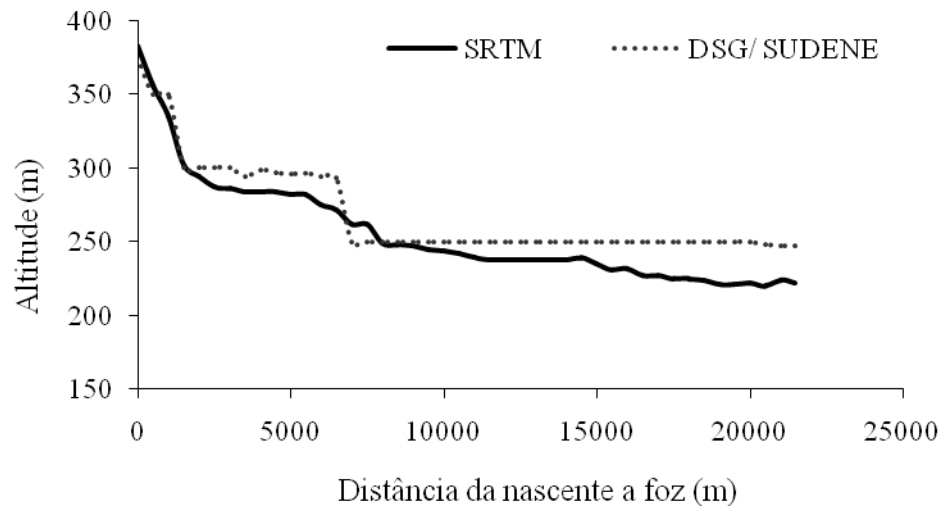


FIGURA 37 - Perfil longitudinal do curso principal da meso-bacia Jenipapeiro

Ao trabalharem na avaliação da variação da rede de drenagem entre dois valores extremos, 500 e 5000 células de *threshold*, Gondim; Teixeira (2007), concluíram que a seleção do número de células por ocasião da definição da rede de drenagem resulta em densidade de malha diferente (maior quando se faz opção por um maior número de células), impactando diretamente no máximo comprimento da rede de drenagem, comprometendo assim a confiabilidade da caracterização dos parâmetros físicos.

Entretanto, estudos realizados por Costa et al. (2007a) utilizando uma acumulação com 5 células contribuintes para se iniciar a rede de drenagem de uma bacia experimental de aproximadamente 12 km<sup>2</sup>, resultaram em valores das variáveis fisiográficas super-estimadas em relação à vetorização da fisiografia das cartas da SUDENE para a região semi-árida do Ceará. Resultados obtidos por Ogren (2004) com 1000 células de acumulação apontam para uma sub-estimativa de micro-bacias devido ao alto valor acumulativo provocado pelo número de células.

Costa et al. (2007b) obtiveram resultados mais representativos da malha de drenagem usando o algoritmo de delimitação automática de bacias quando comparadas às cartas planialtimétricas DSG/SUDENE na escala 1:100.000. Os mesmos indicam o critério de tentativa e erro para escolha do início do curso principal coincidente com mesmo início nas cartas planialtimétricas. Assim, basta que existir coincidência com o início do curso principal de uma bacia para definir o valor de *threshold*. Os autores ainda sugerem valores próximos a 25 células como ideal para uma razoável caracterização da densidade de drenagem.

Maidement (2002) utiliza na delimitação automática, o número de células com acumulação de fluxo necessária para iniciar um curso de drenagem e a partir daí gerar sua

respectiva bacia. Para Dias et al. (2004) a geração dos limites das bacias hidrográficas e seus cursos d'água componentes da mesma requerem a indicação de uma área mínima para o conjunto de sub-bacias a ser gerado. Os mesmos autores utilizaram um valor de 500 células de 90 x 90 m para delimitá-las com valores de área de no máximo 4 km<sup>2</sup>.

As Figuras 38, 39 e 40 exibem a rede de drenagem predominante nas nascentes dos cursos d'água nas bacias do açude Jenipapeiro, Joaquim Távora e Nova Floresta, respectivamente. Por ser necessário determinar um número de células contribuintes para iniciar a rede de drenagem é fundamental a observação da declividade média da bacia, principalmente nas partes mais próximas dos divisores topográficas. Observa-se nas três figuras acima, regiões de maiores declividades delimitando os inícios dos cursos e áreas com menores declividades na área da calha do curso principal. Provavelmente a associação de solos sedimentares profundos com declividades baixas influencie o valor de *threshold* para delimitação automática de bacias hidrográficas não seguindo os valores sugeridos neste trabalho.

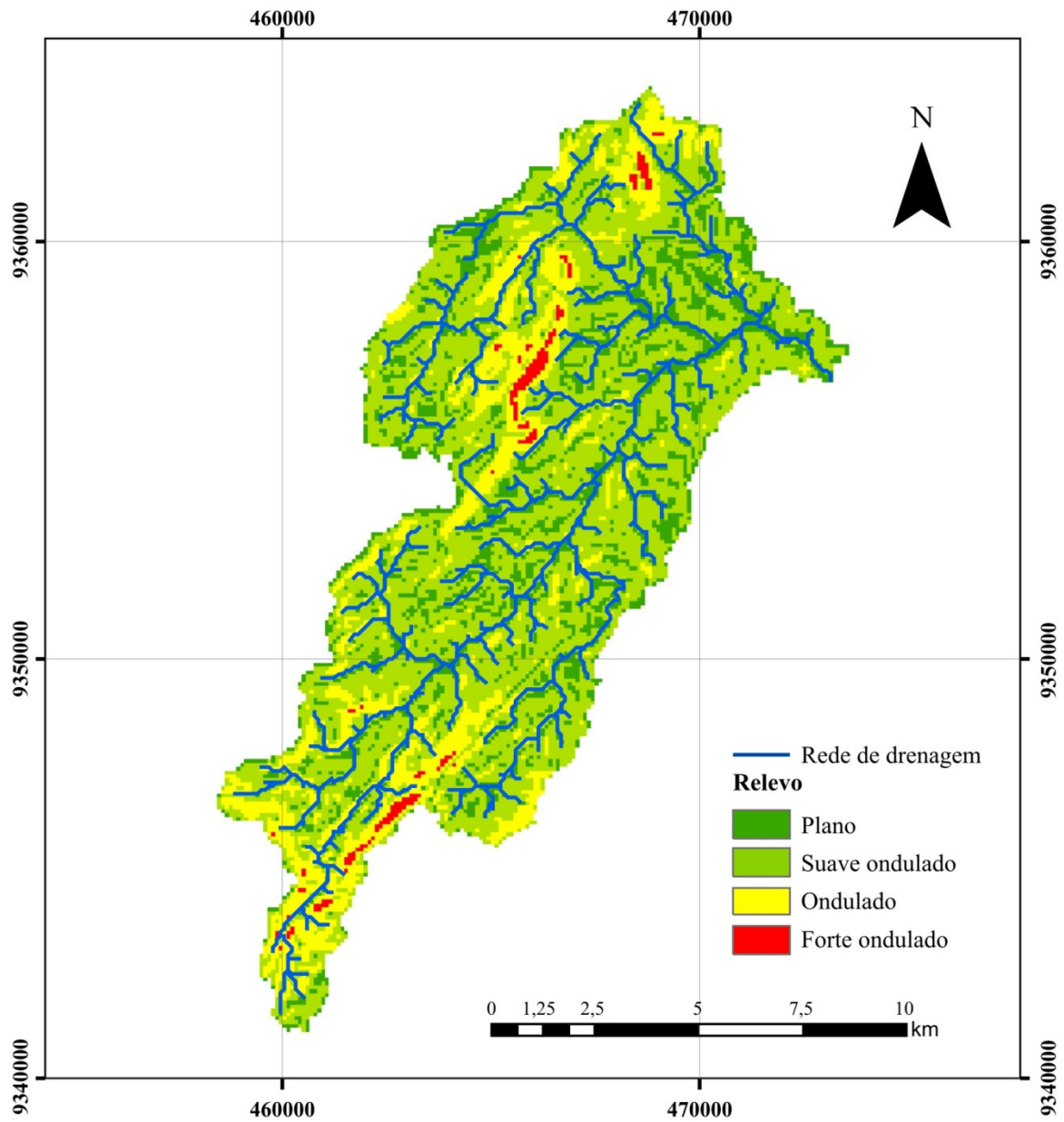


FIGURA 38 - Mapa do relevo da meso-bacia do açude Jenipapeiro

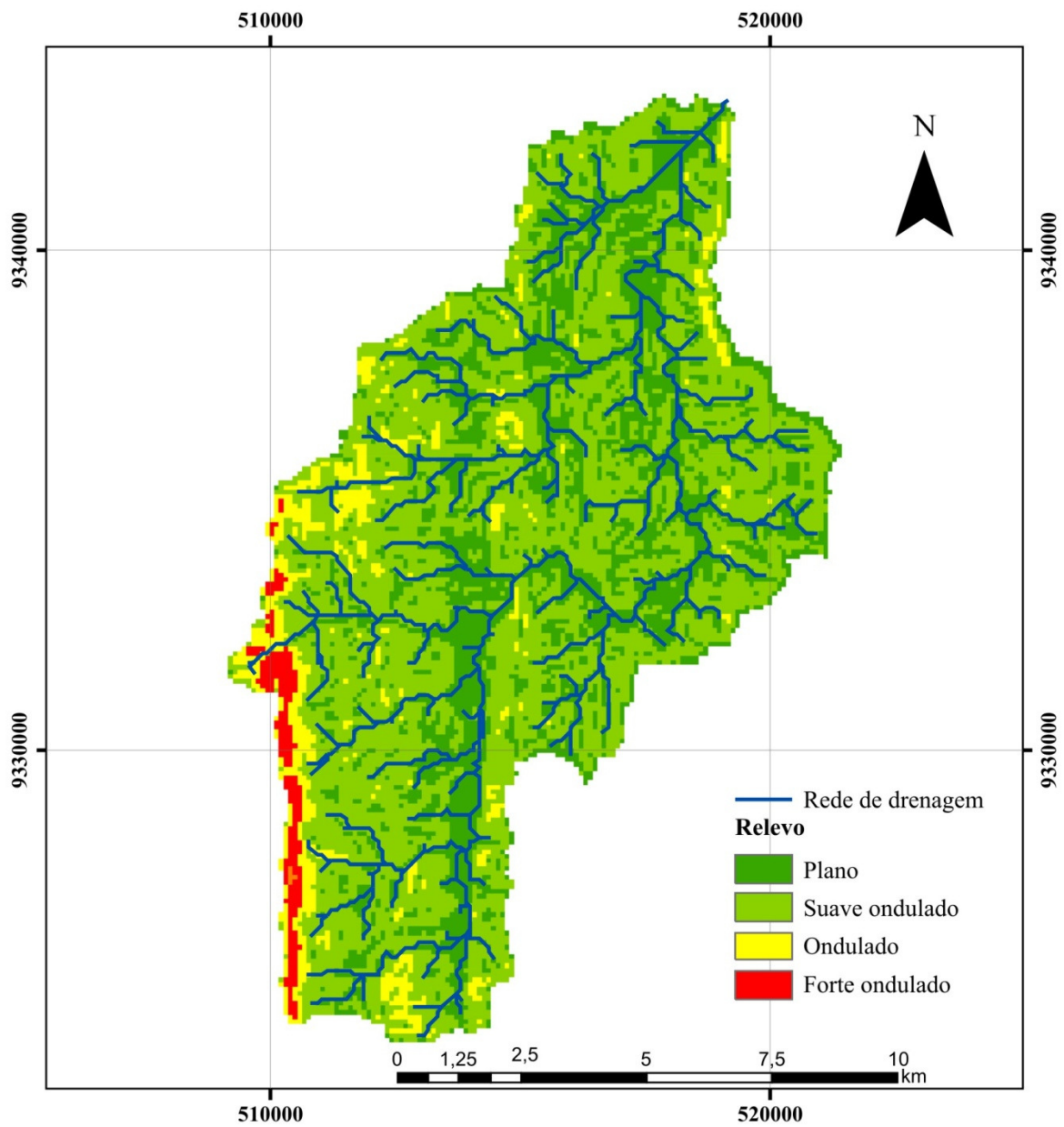


FIGURA 39 - Mapa do relevo da meso-bacia do açude Joaquim Távora



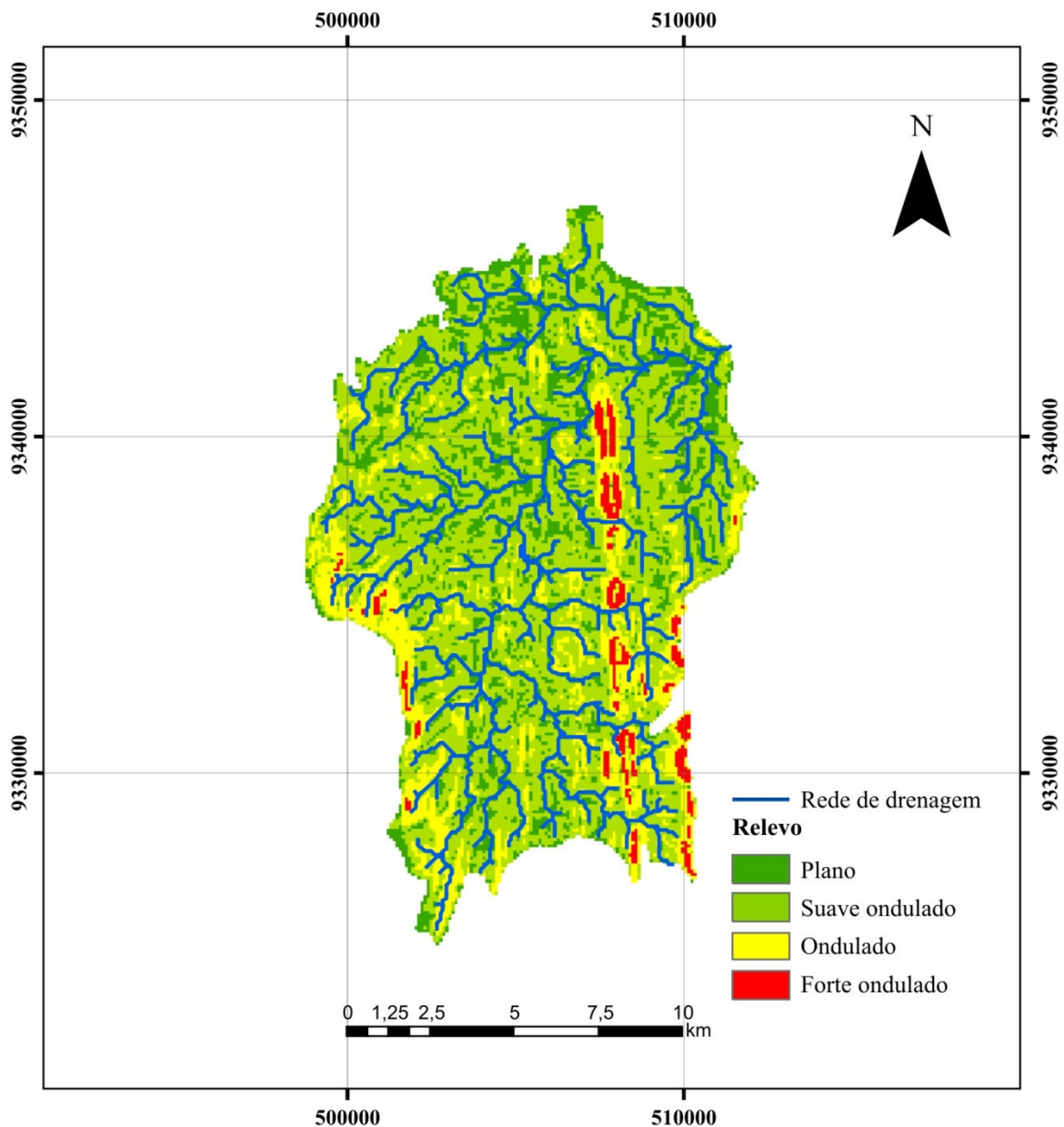


FIGURA 40 - Mapa do relevo da meso-bacia do açude Nova Floresta

A utilização dos dados SRTM com resolução espacial de 90 m para delimitação automática necessita fundamentalmente de uma consulta a um banco de dados consistentes da área com dados para geração da rede de drenagem de micro-bacias. Grandes áreas com relevo plano, com declividades próximas a zero, exigem um número maior de células contribuintes para a geração de uma rede de drenagem, podendo inclusive limitar o uso da delimitação automática para bacias essencialmente planas.

#### 4.2.2 Hipsometria gerada pelos dados SRTM

As Figuras 41, 42 e 43 mostram a hipsografia das três meso-bacias elaborados a partir das cartas DSG/ SUDENE e através dos dados SRTM. Os mapas hipsográficos apresentam a mesma tendência de áreas com mesmas altitudes, ressaltando a facilidade de confecção destes mapas a partir dos dados SRTM, principalmente em relação à confecção dos mesmos através das cartas planialtimétricas oficiais.

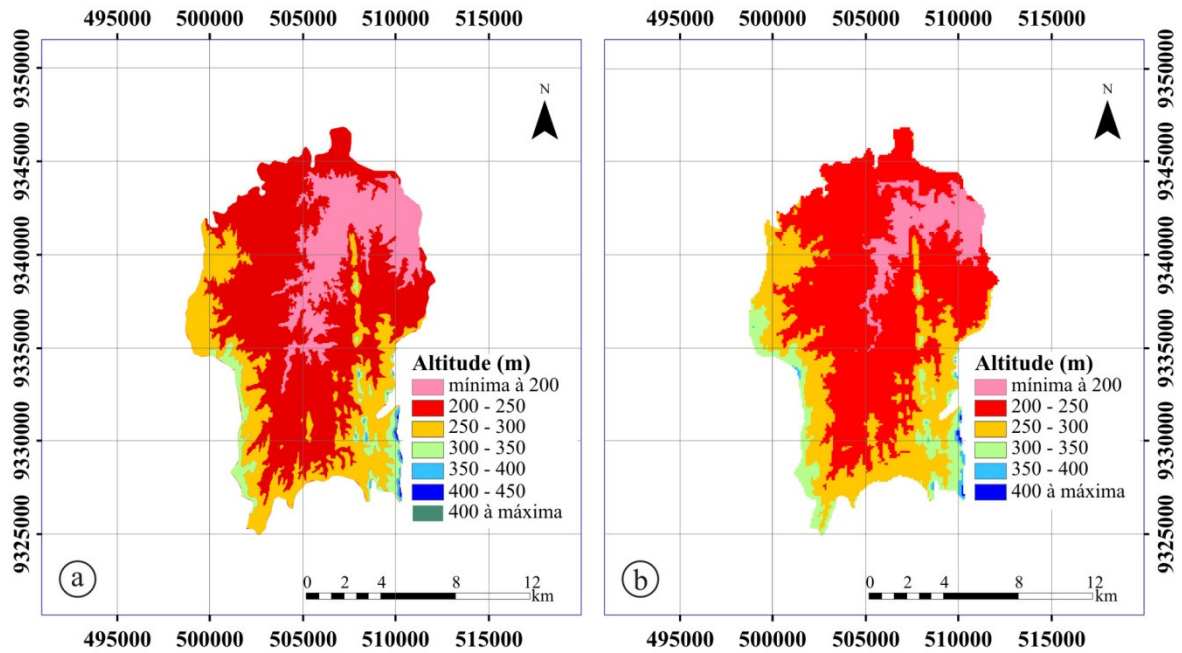


FIGURA 41 - Mapa hipsométrico da meso-bacia do Nova Floresta. Em a) delimitação a partir das cartas DSG/ SUDENE e em b) delimitação e curvas de nível automáticas a partir de dados SRTM/ ArcHydro.

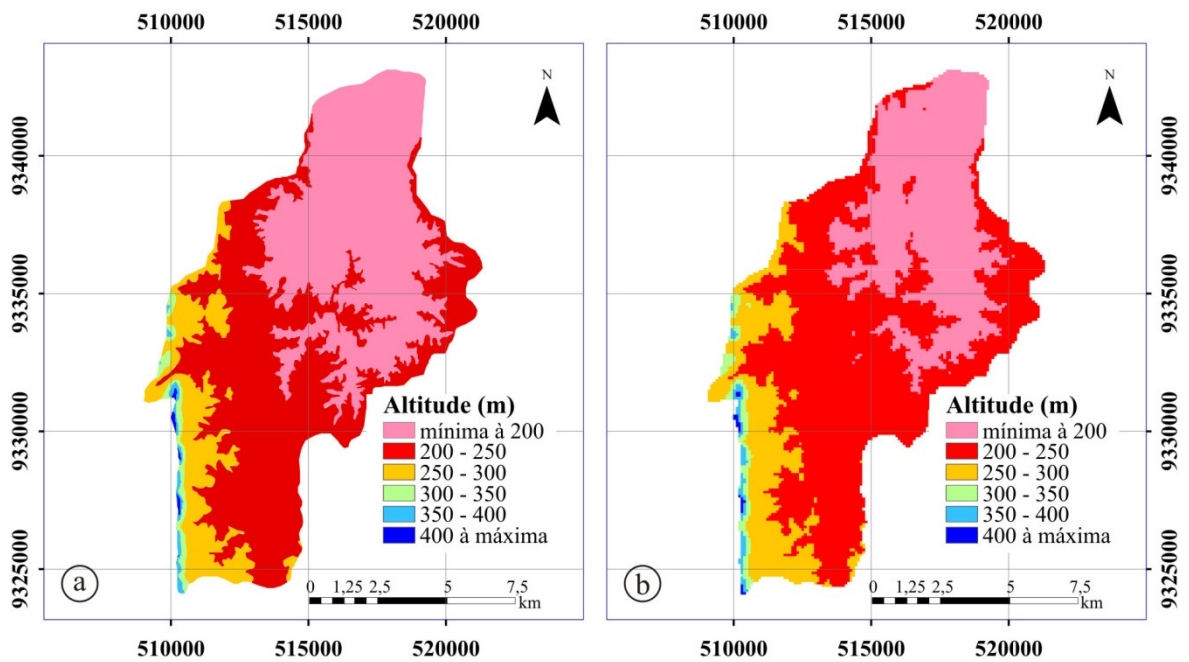


FIGURA 42 - Mapa hipsométrico da meso-bacia do Joaquim Távora. Em a) delimitação a partir das cartas DSG/ SUDENE e em b) delimitação e curvas de nível automáticas a partir de dados SRTM/ ArcHydro.

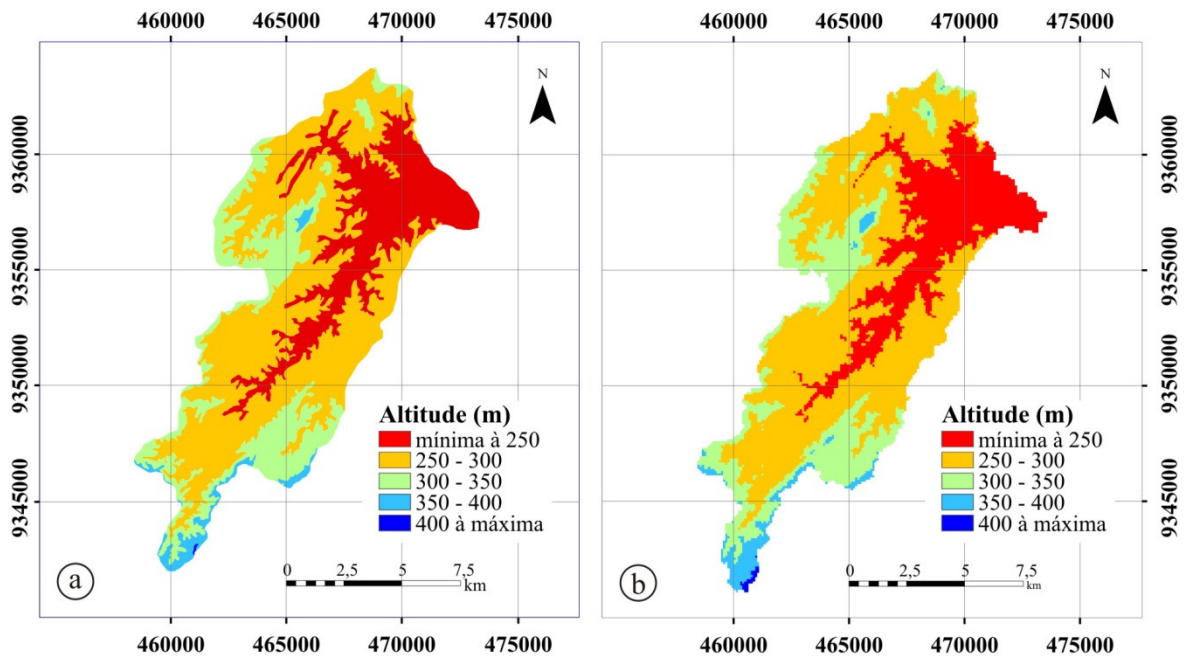


FIGURA 43 - Mapa hipsométrico da meso-bacia do Jenipapeiro. Em a) delimitação a partir das cartas DSG/ SUDENE e em b) delimitação e curvas de nível automáticas a partir de dados SRTM/ ArcHydro.

A Tabela 14 apresenta a variação percentual das áreas entre curvas de nível em relação à área total da respectiva bacia. As duas bases de dados altimétricos apresentam-se semelhantes, com variação mínima de 0,02 % e máxima de 8,95 %. Os maiores valores de variação observados estão nas faixas mais baixas das curvas de nível das meso-bacias do açude Nova Floresta e Joaquim Távora. Isso pode ser explicado pela maior área representada por esta faixa conter variações altimétricas que modificam a sua classe hipsométrica nos dados SRTM. Além disso, a delimitação da parte mais baixa da bacia é mais difícil devido ao menor contraste altimétrico dos divisores topográficos.

TABELA 14 – Variação percentual dos mapas hipsográficos.

Altitude (m)	SRTM/ ArcHydro (km <sup>2</sup> )	carta SUDENE (km <sup>2</sup> )	variação absoluta (km <sup>2</sup> )	variação (%)
<b>Bacia Nova Floresta</b>				
altitude mínima à 200	16,51	31,46	14,95	8,27
200 – 250	103,27	99,25	4,02	2,23
250 – 300	44,95	40,15	4,80	2,65
300 – 350	13,37	8,43	4,94	2,73
350 – 400	1,26	1,17	0,09	0,05
400 à altitude máxima	0,48	0,30	0,18	0,10
Total	179,84	180,76		
<b>Bacia Joaquim Távora</b>				
altitude mínima à 200	38,21	49,17	10,96	8,95
200 – 250	56,07	51,83	4,24	3,46
250 – 300	21,20	17,18	4,02	3,28
300 – 350	4,52	3,00	1,52	1,24
350 – 400	1,34	1,02	0,32	0,26
400 à altitude máxima	0,23	0,21	0,02	0,02
Total	121,57	122,41		
<b>Bacia Jenipapeiro</b>				
altitude mínima à 250	30,96	32,37	1,41	1,06
250 – 300	66,26	66,09	0,17	0,13
300 – 350	30,61	29,50	1,11	0,84
350 – 400	3,40	3,52	0,12	0,09
400 à altitude máxima	1,30	0,04	1,26	0,95
Total	132,53	131,52		

#### 4.2.3 Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente

Os resultados da utilização da ferramenta Terrain Preprocessing da extensão ArcHydro no auxílio à geração de um MDEHC indicam similaridade entre os dados das cartas DSG/ SUDENE e os dados SRTM, sendo um passo fundamental para obtenção de um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente. Através dos processos automáticos descritos

na metodologia e utilizando um *threshold* igual a 25 obteve-se para as meso-bacias em estudo um MDEHC conforme as Figuras 44, 45 e 46, respectivamente para as bacias do açude Floresta, Joaquim Távora e Jenipapeiro. Para representação mais aproximada da realidade é necessário a identificação do início do curso principal no campo ou utilizar um mapa de referência oficial atualizado. Sem essa verificação pode-se gerar uma rede de drenagem que não represente satisfatoriamente a realidade. Marques e Silva (2007), Costa et al (2007a e 2007b) obtiveram resultados satisfatórios quando seguiram essa comparação com mapa de referência.

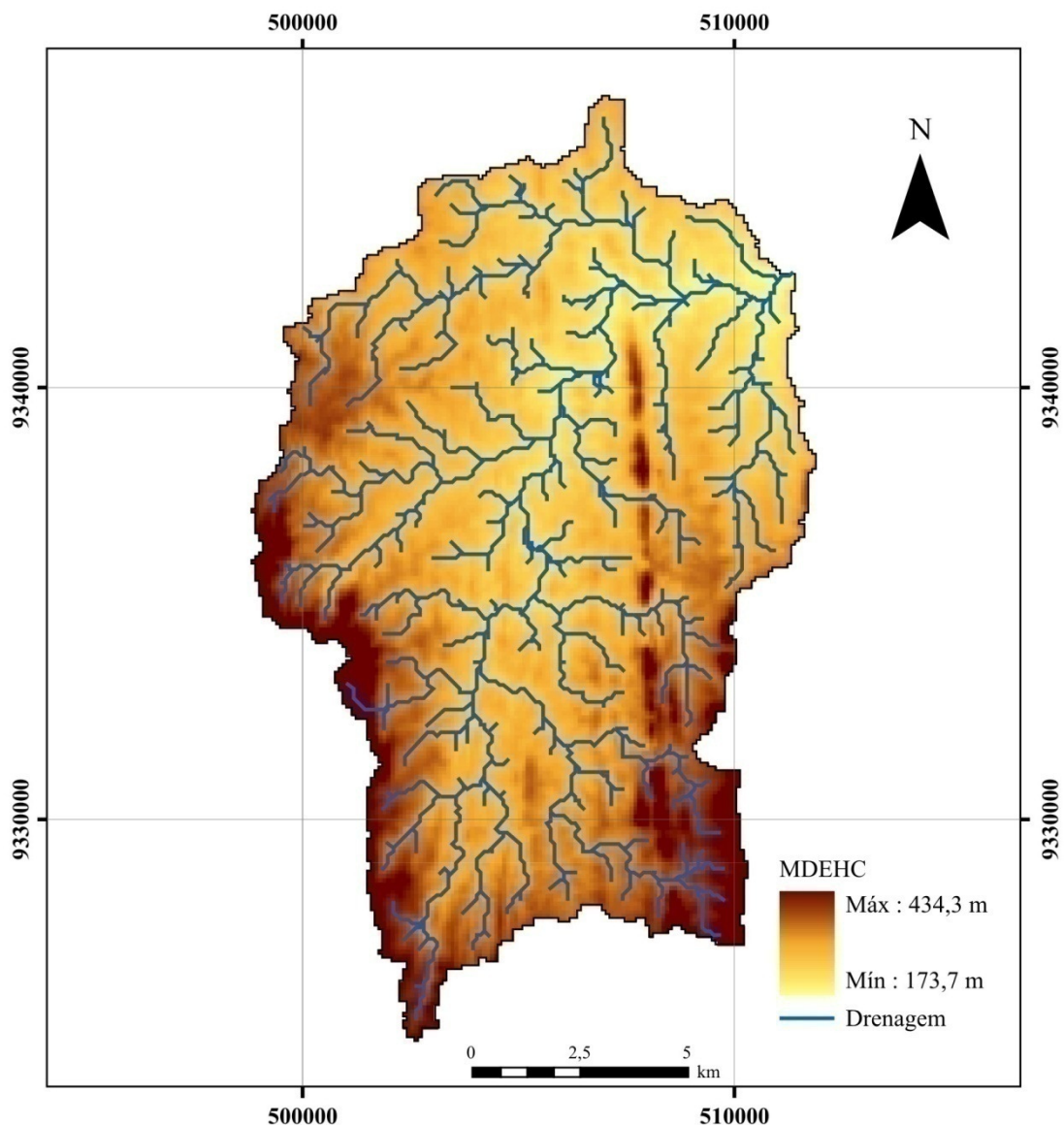


FIGURA 44 - MDEHC para a meso-bacia do açude Floresta

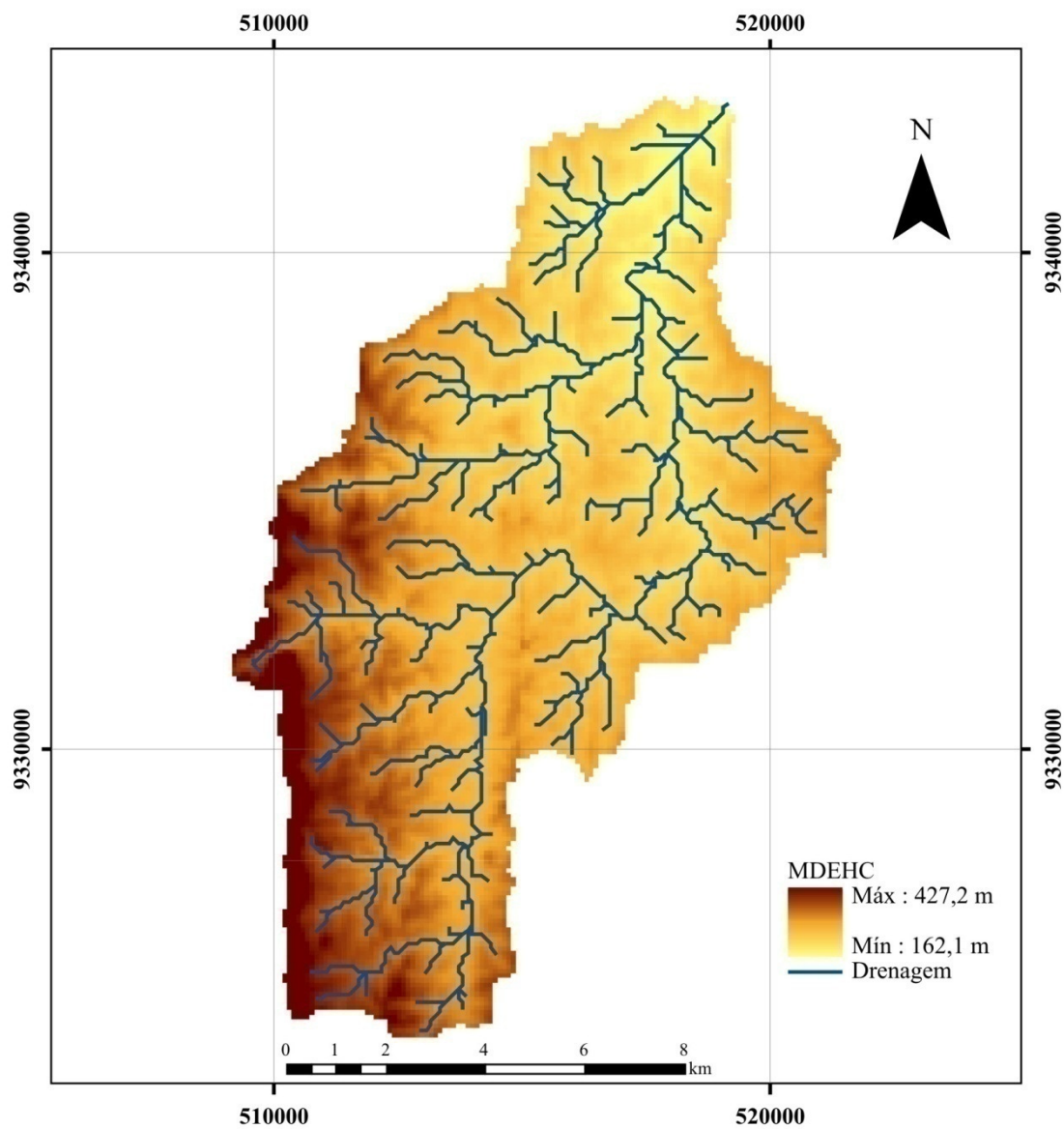


FIGURA 45 - MDEHC para a meso-bacia do açude Joaquim Távora

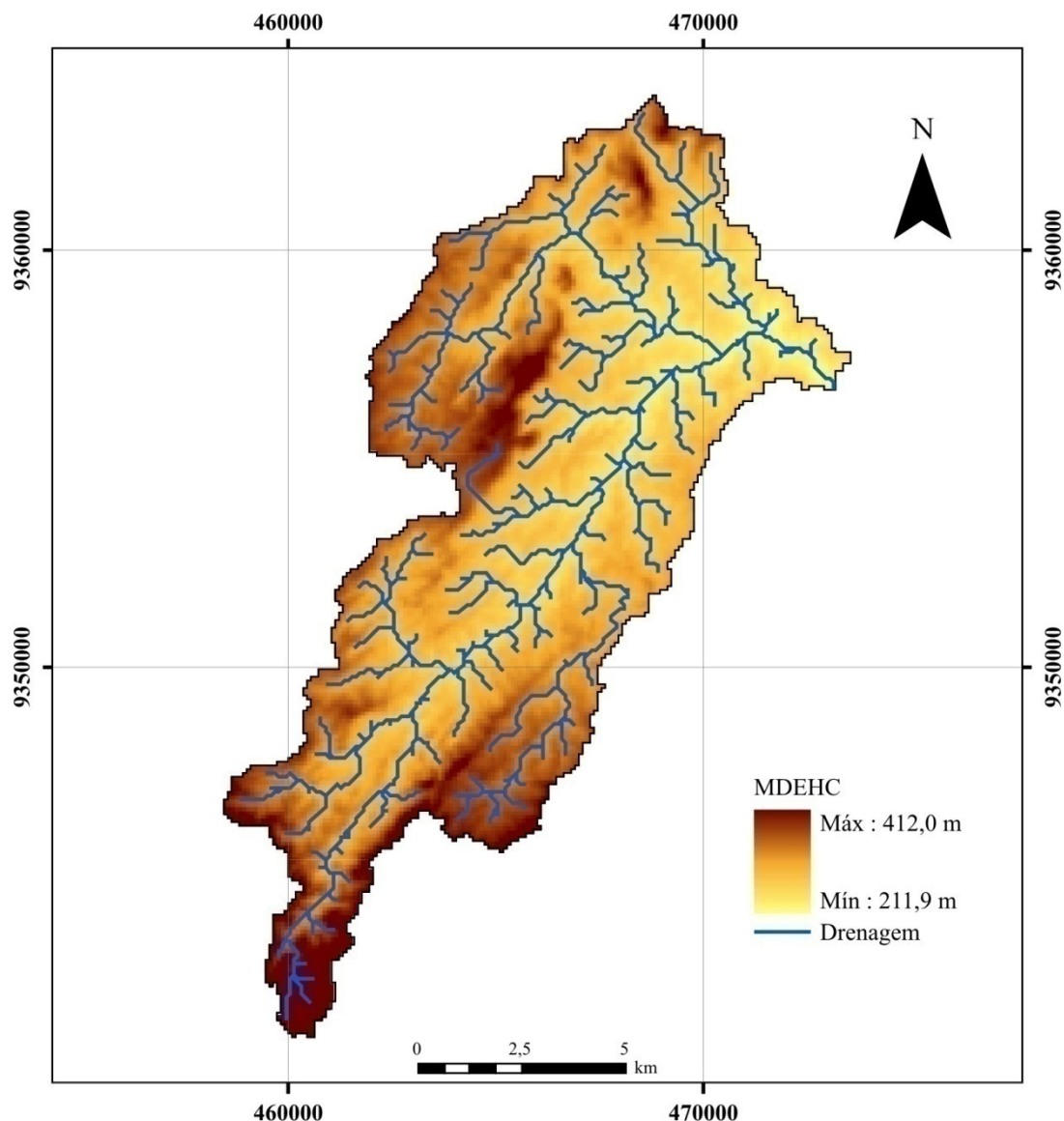


FIGURA 46 - MDEHC para a meso-bacia do açude Jenipapeiro

A geração da rede de drenagem através da extensão ArcHydro é dependente da subjetividade na determinação da acumulação para a formação do início do curso. No entanto, seguindo as cartas planialtimétricas elaboradas na década de 70 pelo Ministério do Exército e SUDENE, para a região semi-árida, pode-se diminuir essa margem de erro, sendo recomendado um valor entre 25 e 50 células com resolução espacial de 90 m provenientes dos dados SRTM

A utilização dos dados SRTM para caracterização morfológica em bacias hidrográficas é oportuna desde que se utilize um valor de acumulação adequado. Este valor deve ser determinado levando-se em consideração uma base de dados referencial homologada.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que, apesar da influência da cobertura vegetal na variação altimétrica, os dados SRTM apresentam-se confiáveis para regiões com vegetação típica do semi-árido.

Os dados SRTM para as áreas da Bacia do Rio Jaguaribe com vegetação de 3,0 m a 4,0 m de altura média atendem segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para a escala de 1:100.000 a classe A. Para vegetação com 5,0 m de altura atendem ao mesmo padrão e escala apenas a classe B. E a áreas com vegetação com 6,0 m de altura os dados SRTM não atendem a nenhuma classe do PEC.

Considerando os tipos de vegetação existentes na Bacia do Rio Jaguaribe, os dados SRTM atenderam à classe A do PEC nas áreas com vegetação tipo: caatinga arbustiva aberta caatinga arbustiva densa, carrasco, zona litorânea, mata ciliar com carnaúba e mata seca. Na vegetação tipo caatinga arbórea e cerradão atendem apenas à classe B. E nas áreas com vegetação do tipo matas úmidas, os dados SRTM não atenderam à nenhuma classe do Padrão de Exatidão Cartográfico na escala 1:100.000.

A delimitação automática de bacias hidrográficas com uso da extensão ArcHydro e dados SRTM é confiável quando se utiliza valores de acumulação de fluxo “*threshold*” adequados. Para essa delimitação deve-se considerar o relevo da bacia, verificar e corrigir as inconsistências da rede de drenagem a partir de uma base de dados oficial ou com dados obtidos no campo.

Para minimizar os erros altimétricos SRTM é necessária a realização de estudos que validem estes dados através de interpolação dos mesmos para uma resolução espacial menor que 90 m.

A elaboração de um material de consulta referencial e atualizado com a caracterização fisiográfica envolvendo o uso do Sistema de Informações Geográficas e Modelo Numérico do Terreno torna-se fundamental à medida que aumentam as possibilidades de geração de produtos advindos do sensoriamento remoto e geoprocessamento.



## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A. **SDIG-PB**: Proposta de um Sistema Distribuído de Informação Geográfica para auxílio à gestão de recursos hídricos da Paraíba. 1999. 126 f. Dissertação (Mestrado em Informática) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E. V. S.B; ARAÚJO, E. L. Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. **Revista Acta Botanica Brasilica**, São Paulo. v. 19 n.3, p. 615-623. 2005

AQUINO, D. N.; LOPES, F. B.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Aplicação da USLE e SIG na estimativa da perda de solos em uma micro-bacia hidrográfica do Semi-árido do estado do Ceará. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (CONBEA), 2007, Bonito - MS, **Anais...** 2007

ARAÚJO, J. C.; DOLL, P.; GUENTNER, A.; KROL, M.; ABREU, C. B. R.; HAUSCHILD, M.; MEDIONDO, E. M. Water scarcity under scenarios for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, Carbondale, v. 29 n. 2, p. 209-220, 2004.

ARAÚJO, L. F. P. O processo de gestão da água no Ceará: o contexto da bacia hidrográfica do Jaguaribe. In: **Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará**. Editores ROSA, M. F.; GONDIM, R. S.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Fortaleza-CE. Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. p. 17-23.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: Funep, 2006. 237 p.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Necessidades de irrigação das culturas na Bacia do Baixo Jaguaribe. In: **Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará**. Editores: ROSA, M. F.; GONDIM, R. S.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Fortaleza-CE. Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. p. 301-369.

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; COSTA JÚNIR, N. A. Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), Goiânia, **Anais...INPE**, 2005. p. 3997-4004.

BONNET, B. R. P.; FERREIRA, L. G.; LOBO, F. C. Sistema de Reserva Legal Extra-Propriedade no Bioma Cerrado: Uma Análise Preliminar no Contexto da Bacia Hidrográfica. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 58/02, p 129-137. 2006.

BOURGINE, B.; BAGHDADI, N. Assessment of C-band SRTM DEM in a dense equatorial forest zone. **Comptes Rendus Geoscience** n. 337, p. 1225-1234. 2005.

BRAGA, C. C.; BRITO, J. I. B. de; SANSIGOLO, C. A.; RAO, T. V. R. Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v. 11, n. 1, p. 149-157, 2003.

BRASIL. Decreto n.89.817 de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, 22 de junho de 1984.

CÂMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos**. 1995. 265 f. Tese (Doutorado em Ciência Aplicada), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1995.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPOS, J. N. B. **Dimensionamento de reservatórios: o método do Diagrama Triangular de regularização**. Edições UFC. Fortaleza, 1996. 51p.

CAVALCANTE, M. B.; NASCIMENTO, S. M. S. G. **Áreas Protegidas na Caatinga: Um estudo de caso no Parque Estadual da Pedra da Boca**. Artigo apresentado a Disciplina Estudos de Impactos Ambientais (EIA), Curso de Especialização em Ciências Ambientais – FIP/PB, 2006.

CCRS - Canada Centre for Remote Sensing. **Research of the CCRS SAR System**. Dez. 2006 Disponível em: <[http://ccrs.nrcan.gc.ca/radar/airborne/cxsar/sbinter\\_e.php](http://ccrs.nrcan.gc.ca/radar/airborne/cxsar/sbinter_e.php)>. Acesso em: dezembro, 2006.

CHIEN, P. Endeavour maps the world in three dimensions. **Geoworld**, n. 37, p. 32-38. Abril. 2000.

COSTA, C. A. G.; ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; TERAPO, D. Uso de agrotóxicos em propriedades agrícolas no Baixo Jaguaribe. In: **Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará**. Editores ROSA, M. F.; GONDIM, R. S.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Fortaleza-CE. Embrapa Agroindústria Tropical. 2006. p.197-220.

COSTA, C. A. G.; COSTA, A. C.; TEIXEIRA, A. S.; ALVES, N. N. L.; ANDRADE, E. M.; SOUSA, B. F. S.; LEÃO, R. A. O. Comparação do uso do SRTM para delimitação e caracterização fisiográfica de uma micro-bacia hidrográfica. In: XIII SBSR, Florianópolis,

**Anais...INPE**, p. 4833-4840. 2007 (a).

COSTA, C. A. G.; OLIVEIRA, A. D. S.; ALVES, N. N. L.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; LOPES, F. B.; AQUINO, D. N. Uso do SRTM para delimitação automática e caracterização fisiográfica de uma meso-bacia hidrográfica. In: XXXVI CONBEA, Bonito - MS, **Anais... SBEA**. 2007 (b)

DALLEMAND, J. F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R. K.; SCHUMANN, R. **Principes d'imagerie radar**. Rome, FAO/ESA, 1991 (RSC Series 67)

DANA, P. **Global Positioning System Overview**. Edição Online. 2008. Disponível em: <<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>>. Acesso: jan. 2008.

DATA EAST. Xtools Pro. Version 5.0. Disponível em: <<http://www.xtoolspro.com>>. Acesso: jul-2006.

DIAS, L. S. O.; ROCHA, G. A.; BARROS, E. U. A.; MAIA, P. H. P. Utilização do RADAR interferométrico para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Bahia Análise e Dados**, Salvador, v. 14, n. 2, p. 265-271, set. 2004.

DLR X-SAR/SRTM - Shuttle RADAR Topography Mission. **Mapping the Earth from Space**. Maio. 2007. Disponível em: [http://www2.dlr.de/oeffentlichkeit/specials/sonderseiten/srtm/srtm\\_folder\\_02.pdf](http://www2.dlr.de/oeffentlichkeit/specials/sonderseiten/srtm/srtm_folder_02.pdf)>. Acesso em: maio 2007.

DONHA, A. G; SOUZA, L.C. de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.10, n.1, p. 175-181, mar. 2006.

DORNELAS, K. D. S. D.; SILVA, C. L. S.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.8, p.1213-1219, ago. 2006

DOWDING, S.; KUUSKIVI, T.; LI, X. **Void fill of SRTM elevation data**. Principle, processes and performance, in: ASPRS Images to Decision: Remote Sensing Foundation for GIS Applications, Kansas City, MO, USA. Set. 2004

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: IV WORKSHOP EM TRATAMENTO DE IMAGENS, 2003, Belo Horizonte, **Anais... NPDI/DCC/ICEX/UFMG**, 2003. p. 4-13.

ELOI, F. H; SOUZA, J. C. P. Detecção do multicaminho nas observações GPS de uma

estação da RBMC: Estudo de caso. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2006, Aracaju/SE, **Anais...** 2006

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ARC/INFO v.7.1.1**. Help on Line. Redlands, Califórnia: ESRI, 1997.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcHydro Tools v 1.1 Beta 2** – Tutorial. Califórnia: ESRI, 2003.

EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, G. M. Avaliação de dois tipo de evaporímetros na estimativa da demanda evaportiva do ar (ET) no interior de casa de vegetação em Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. v.27, n.6, p.1348-1353, nov./dez., 2003.

FERREIRA, D. F. **Sistema de análise de variância de dados balanceados SISVAR**: pacote computacional. Lavras: UFLA/DEX, 2000.

FIGUEIREDO, M. A. **A cobertura vegetal do estado do Ceará e as condições ambientais**. (Tese de Professor Titular) Fortaleza, UFC, 1991.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Paper 1 - Digital elevation model issues in water resources modeling. In: **Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems**. MAIDMENT, D.; DJOKIC, D. (Eds). Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2000. p.1-28.

GARJULLI, R.; OLIVEIRA, J. L. F.; ALVAREZ, U. P.; BEZERRA, H. E. R. **Proposta metodológica para a organização de usuários de água**: a experiência do Ceará. Maio. 2001. Disponível em: <<http://www.cogerh.com.br/gestão/metodologia.html>>. Acesso em: maio 2006.

GESCH, D. B.; VERDIN, K. L.; GREENLEE, S. K. New land surface digital elevation model covers the earth: Eos, Transactions. **American Geophysical Union**, v. 80, n. 6, p. 69-70. 1999.

GESCH, D.B. Vertical accuracy of SRTM data of the United States: Implications for Topographic Change Detection. USGS. In **SRTM data validation and applications workshop**. Jun. 2005.

GLOBAL MAPPER **Forum e Tutorials**. Fev. 2008. Disponível em: <<http://www.globalmapperforum.com/>>. Acesso em: fev. 2008.

GOLDENFUM, J. A. **Pequenas Bacias Hidrológicas: Conceitos Básicos** in: Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Org.: Paiva, J. B. D. e Paiva E. M. C. D. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap 1.

GONDIM, R. S.; TEIXEIRA, A. S. Delimitação da sub-bacia do Alto Jaguaribe utilizando o Modelo Numérico do Terreno. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (SBRH). São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABRH, CD, 2007

GORDON, N.D., McMAHON, T.A.; FINLAYSON, B.L. **Stream hydrology, an introduction for ecologists**. John Wiley e Sons, Chichester, 526 p. 1992.

HEIPKE, C.; KOCH, A.; LOHNANN, P. **Analysis of SRTM DTM – Methodology and Practical Results**. ISPRS Commission – IV Symposium. Ottawa. 2002

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v.106, n.3-4, p.211-232, 1989.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema Geodésico Brasileiro: Rede Altimétrica**. Out. 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetrica.shtm>>. Acesso em: out. 2007.

IPLANCE. Atlas do Ceará. Edições Iplance, Fortaleza, 1998. 64 p.

JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A.; MULLIGAN, M. **Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali, CO : Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. 32 p. (Working document no. 198)

JPL Jet Propulsion Laboratory – **Shuttle RADAR Topography Mission**. Out. 2007. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm>>. Acesso em: out. 2007.

KAZMIERCZAK, M, L. Uso de dados AVHRR/NOAA GAC para análise da sazonalidade da caatinga. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996. p. 513-518.

LEÃO, R. A. O., TEIXEIRA, A. S., ANDRADE, E. M., OLIVERA, F. Delimitação e caracterização automática de uma micro-bacia hidrográfica da Fazenda Experimental Vale do Curu. Pentecoste-CE. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 35, n.1, p. 26-35,

Jan.-Jun. 2004.

LUDWIG, B., DAROUSSIN, J., KING, D., SOUCHERE, V. Using GIS to predict concentrated flow erosion in cultivated catchments. In: HydroGIS 96: Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, 1996, Vienna. **Proceedings...**Vienna, n. 235, 1996.

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. Realidade e Perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. In: II COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, **Anais...** Curitiba, PR, 2001.

MAIDEMENT, D. R. **ArcHydro GIS for Water Resources**. ESRI Press. Redlands California 2002.

MARQUES, I F. A.; SILVA, D. D. Obtenção pixel a pixel de variáveis morfométricas e pluviométricas após tratamento de dados SRTM. In: XVII SBRH, São Paulo, **Anais...** São Paulo, CD, 2007

MENDES, C.A.B, CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em recursos hídricos**: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: ABRH, 2001, 536 p.

MILIAREISIS, G. C.; PARASCHOU, C. V. E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** v. 7, p. 49–59. 2005.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: descrição, fundamentos e aplicações, Ed. UNESP, 2000

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling: a review of hydrological geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30. 1991.

MOREIRA, D. M; ARAÚJO, L. M. N, ALMEIDA, I. S.; ROTUNNO FILHO, O. Apoio Cartográfico a estudos hidrológicos utilizando ferramentas de geoprocessamento. In:XVII SBRH, São Paulo, **Anais...** São Paulo, CD, 2007.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 1ª ed. São José dos Campos – SP, INPE, 2005. 250 p.

NASA. **SRTM**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: mar. 2007.

NOERNBERG, M. A. **Discriminação de plantas aquáticas utilizando dados SAR multipolarimétricos na banda C.** 1996. 131 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) São José dos Campos, 1996.

OGREN, J. **Using ArcHydro Tools to Analyze Conservation Priorities.** Geography and the Environment Department, University of Texas at Austin CE 394K Term Project Proposal Fall. 2004

OLIVEIRA, A. D. S.; AQUINO, D. N.; COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. S. Utilização do Sistema de Informações Geográficas para estimativa do pico de descarga na bacia do açude Aracoíaba-CE. In: XXXVI CONBEA, Bonito, **Anais...** Bonito, 2007

OLIVERA, F. Extracting Hydrologic Information from Spatial Data for HMS Modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, v. 6, n. 6, p. 524-530. 2001.

OLIVERA, F.; FURNANS, J.; MAIDMENT, D.; DJOKIC, D.; YE, Z. Drainage systems In: MAIDEMENT, D. R. **ArcHydro GIS for Water Resources.** ESRI Press. Redlands California 2002. p. 55-86

PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION, cartas topográficas e GPS: Numa área com relevo escarpado **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 58/1 p. 1-9, 2006.

PORTO, M. M.; ANDRADE, M. A.; COSTA, R. N. T.; LEMOS FILHO, L. C. A.; MEIRELES, M. Identificação de bacias hidrográficas com características físicas similares no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 35, n.1, p. 17-25, Jan.-Jun. 2004.

PRATES, G. **NAVSTAR GPS: Sistema de Posicionamento Global** edição on line. 2004. Disponível em: <[http://w3.ualg.pt/~gprates/navstar\\_gps.pdf](http://w3.ualg.pt/~gprates/navstar_gps.pdf)>. Acesso: jan. 2008.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle RADAR topography-a new class of digital elevation models acquired by space borne RADAR. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.57, p. 241-262, 2003.

RAGGAM, J.; GUTJAHR, K.; ALMER, A. MOMS-2P und RADARSAT: Neue Sensoren zur stereometrischen Geländemodellerstellung. **Vermessung und Geoinformation** n. 4, p. 267-280. 1997.

RAO, K. S. **Validation of Digital Elevation Model Derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS Field measurements.** 2004. Disponível em:

<<http://www.gisdevelopment.net/technology/gps/ma03033abs.htm>>. Acesso em dez-2006.

RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; OLIVEIRA, A. M. S.; GLERIANI, J. M. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.2, p.203-212, 2005.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; TEIXEIRA, A. dos S. T. Modelos da concentração iônica em águas subterrâneas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.38, n.4, p.360-365, Out.- Dez., 2007.

ROSKILDE UNIVERSITY **Hydrology Modeling Sample Extension**. 2007. Disponível em: <[http://www.maproom.ruc.dk/Courses/natbas/geografi-b/Hydro\\_model/hydrology\\_modeling\\_sample\\_extens.htm](http://www.maproom.ruc.dk/Courses/natbas/geografi-b/Hydro_model/hydrology_modeling_sample_extens.htm)>. Acesso em: maio 2007.

SANTOS, E. S.; SILVA, J. R. L.; ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, A. A. A. Caracterização morfométrica da bacia experimental do Riacho Jatobá Pesqueira-PE. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais... CD. São Paulo, 2007

SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n 58/01, Abril, 2006.

SAUNDERS, W. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE. 1999, San Diego. **Proceedings...San Diego**. 1999.

SEPLAN Secretaria do Planejamento. **Projeto Áridas**: grupo de trabalho 1, recursos naturais e meio ambiente. Fortaleza: v. 2 – 221 p – 1994

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: **Hidrologia**: ciência e aplicação. TUCCI, C. E. M. (Org.). 2ª edição (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4). Porto Alegre: editora da Universidade/ UFRGS: ABRH, 2000. p 35-51.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, Jan.-Mar. 2005.

SOULSBY, C.; P.J. RODGERS, P. J.; PETRY, J.; HANNAH, D. M.; MALCOLM, I. A.; DUNN, S.M. Using tracers to upscale flow path understanding in mesoscale mountainous catchments: two examples from Scotland. **Journal of hydrology**, v. 291, p. 174-196. 2004.



SOUZA, C. R. M. **Interferidores de GPS**: Análise do sistema de potenciais fontes de interferência. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Instituto Militar de Engenharia (IME) Rio de Janeiro, 2005.

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

SYLVANDER S.; COUSSON D.; GIGORD, P. Etude des performances geometriques des images RADARSAT. **Bulletim de la Societé Française de Photogrammétrie et de Télédétection**, n. 148, p. 57-65. 1997

TARBOTON, D. G., BRAS, R. L., RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, n.5, p. 81-100. 1991.

TOMMASELLI, A. M. G. Modernas tecnologias para coleta de informações espaciais. In: II SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2004, Aracaju. **Anais...** Aracaju. 2004.

TONIOLO, E. R.; DANTAS, M. J. B. **Mapeamento da Cobertura Florestal Nativa Lenhosa do Estado do Ceará**. Documento de campo nº 27. Desenvolvimento Florestal Integrado no Nordeste do Brasil. Fortaleza, PNUD/FAO/IBAMA/SDU/SEMACE, 1994 45p. il.

TOUTIN, T. Error Tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, 1999.

TOUTIN, T. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. **ISPRS Journal Photogrammetry & Remote Sensing**. v.57, n.3, p.228-240, 2002.

TOUTIN, T.; GRAY, L. State of the art of elevation extraction from satellite SAR data. **ISPRS Journal Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 55, n.1, p.13-33, 2000.

TREVETT, J. W. *Imagin radar for resources surveys*. New York. Chapman & Hall. 1986. 313p.

TUCCI, C. E. .M. **Regionalização de vazões**. editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto alegre. 2002. 256 p.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing**: active and

passive. Reading, Addison-Wesley, v.3. 1986.

USGS United State Geological Survey - **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: < <http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso: set. 2007.

VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n 59/01, p. 63-71. abril, 2007.

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, INPE, 2004, 72p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

## APÊNDICE A

TABELA 15 – Variação fisiográfica (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para a meso-bacia Nova Floresta com cinco valores de acumulação.

Nova Floresta

Parâmetro	und	Cartas DSG/ SUDENE	células contribuintes – <i>threshold</i>				
			25	50	75	100	125
Densidade da rede de drenagem (Dd)	km/km <sup>2</sup>	1,377	1,501	1,161	0,938	0,848	0,776
Declividade do curso principal (Dcp)	%	1,365	1,471	1,590	1,473	1,541	1,490
Comprimento da bacia (Lb):	km	19,760	19,584	19,584	19,584	19,584	19,584
Fator de forma da bacia	-	0,463	0,467	0,469	0,469	0,469	0,469
Coefficiente de compacidade	-	1,594	1,843	1,786	1,786	1,786	1,786
Sinuosidade do rio principal	-	1,517	1,455	1,450	1,441	1,424	1,408
Tempo de concentração da bacia	h	1,122	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120
Extensão média do escoamento superficial	km	1,508	1,570	1,584	1,594	1,612	1,630
Altitude Máxima	m	458,000	440,100	440,100	440,100	440,100	440,100
Altitude Mínima	m	175,000	174,800	174,800	174,800	174,800	174,800
Comprimento do curso principal	km	29,975	28,503	28,391	28,215	27,893	27,580
Área da bacia	km <sup>2</sup>	180,762	179,030	179,843	179,843	179,843	179,843
Comprimento da rede de drenagem	km	248,867	268,655	208,803	168,662	152,443	139,497
Perímetro da bacia	km	76,533	88,088	85,560	85,560	85,560	85,560
Declividade média da bacia	%	0,689	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698

TABELA 16 – Variação fisiográfica (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para a meso-bacia Joaquim Távora com cinco valores de acumulação.

Joaquim Távora							
Parâmetro	und	Cartas DSG/ SUDENE	células contribuintes - <i>threshold</i>				
			25	50	75	100	125
Densidade da rede de drenagem (Dd)	km/km <sup>2</sup>	1,317	1,512	1,097	0,913	0,792	0,724
Declividade do curso principal (Dcp)	%	1,240	1,632	1,503	1,444	1,393	1,489
Comprimento da bacia (Lb):	km	20,610	20,698	20,698	20,698	20,698	20,698
Fator de forma da bacia	-	0,288	0,284	0,285	0,284	0,284	0,284
Coefficiente de compacidade	-	1,430	1,794	1,781	1,794	1,795	1,795
Sinuosidade do rio principal	-	1,295	1,445	1,434	1,413	1,391	1,383
Tempo de concentração da bacia	h	0,947	1,023	1,120	1,120	1,120	1,120
Extensão média do escoamento superficial	km	1,485	1,016	1,028	1,039	1,055	1,062
Altitude Máxima	m	458,000	439,600	439,600	439,600	439,600	439,600
Altitude Mínima	m	179,000	160,600	160,600	160,600	160,600	160,600
Comprimento do curso principal	km	26,700	29,912	29,690	29,249	28,801	28,617
Área da bacia	km <sup>2</sup>	122,410	121,568	122,093	121,568	121,568	121,568
Comprimento da rede de drenagem	km	161,240	183,801	133,938	110,970	96,283	88,068
Perímetro da bacia	km	56,500	70,656	70,288	70,656	70,677	70,690
Declividade média da bacia	%	1,246	1,118	1,118	1,118	1,118	1,118

TABELA 17 – Variação fisiográfica (SRTM/ArcHydro - DSG/ SUDENE) para a meso-bacia Jenipapeiro com cinco valores de acumulação.

Jenipapeiro							
Parâmetro	und	Cartas DSG/ SUDENE	células contribuintes - <i>threshold</i>				
			25	50	75	100	125
Densidade da rede de drenagem	km/km <sup>2</sup>	1,421	1,469	1,084	0,892	0,802	0,726
Declividade do curso principal	%	4,029	2,340	2,236	1,966	1,972	1,963
Comprimento da bacia	km	20,000	19,927	19,927	19,927	19,927	19,927
Fator de forma da bacia	-	0,329	0,335	0,334	0,334	0,334	0,334
Coefficiente de compacidade	-	1,648	2,245	2,248	2,242	2,242	2,242
Sinuosidade do rio principal	-	1,092	1,312	1,308	1,269	1,258	1,258
Tempo de concentração da bacia	h	0,968	1,035	1,120	1,120	1,120	1,120
Extensão média do escoamento superficial	km	1,505	1,270	1,271	1,310	1,322	1,322
Altitude Máxima	m	400,000	413,700	413,700	413,700	413,700	413,700
Altitude Mínima	m	246,000	210,800	210,800	210,800	210,800	210,800
Comprimento do curso principal	km	21,843	26,152	26,060	25,287	25,064	25,064
Área da bacia	km <sup>2</sup>	131,520	132,893	132,530	132,537	132,530	132,530
Comprimento da rede de drenagem	km	186,900	195,229	143,642	118,223	106,262	96,256
Perímetro da bacia	km	67,480	92,410	92,435	92,184	92,180	92,180
Declividade média da bacia	%	0,652	0,739	0,739	0,739	0,739	0,739

TABELA 18 – Variação média da caracterização fisiográfica (SRTM/ ArcHydro - DSG/ SUDENE) para as três meso-bacias.

Parâmetro	Und	células contribuintes – <i>threshold</i>				
		25	50	75	100	125
Densidade da rede de drenagem (Dd)	km/km <sup>2</sup>	0,12	0,25	0,45	0,55	0,63
Declividade do curso principal (Dcp)	%	0,72	0,76	0,79	0,79	0,81
Comprimento da bacia (Lb):	km	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Fator de forma da bacia	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coefficiente de compacidade	-	0,40	0,38	0,38	0,38	0,38
Sinuosidade do rio principal	-	0,14	0,14	0,12	0,11	0,12
Tempo de concentração da bacia	h	0,04	0,10	0,10	0,10	0,10
Ext. média do escoamento superficial	km	0,25	0,25	0,24	0,23	0,24
Altitude Máxima	m	16,66	16,66	16,66	16,66	16,66
Altitude Mínima	m	17,93	17,93	17,93	17,93	17,93
Comprimento do curso principal	km	2,99	2,93	2,58	2,46	2,51
Área da bacia	km <sup>2</sup>	1,31	0,74	0,92	0,92	0,92
Comprimento da rede de drenagem	km	16,89	36,87	66,38	80,67	91,06
Perímetro da bacia	km	16,88	15,92	15,96	15,96	15,97
Declividade média da bacia	%	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

**ANEXO A**



## BREVE HISTÓRICO DA FORMAÇÃO DA RAAP

“Texto extraído de IBGE (2007)”

Em 13 de Outubro de 1945, a Seção de Nivelamento (SNI) iniciava os trabalhos de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão, dando partida ao estabelecimento da Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). No Distrito de Cocal, Município de Urussanga, Santa Catarina, onde está localizada a Referência de Nível RN 1-A. Em Dezembro de 1946, foi efetuada a conexão com a Estação Maregráfica de Torres, Rio Grande do Sul, permitindo, então, o cálculo das altitudes das Referências de Nível já implantadas. A partir daí o Brasil dispunha de uma estrutura altimétrica fundamental, destinada a apoiar o mapeamento e servir de suporte às grandes obras de engenharia, sendo de vital importância para projetos de saneamento básico, irrigação, estradas e telecomunicações. Em 1958, quando a Rede Altimétrica contava com mais de 30.000 quilômetros de linhas de nivelamento, o Datum de Torres foi substituído pelo Datum de Imbituba, definido pela estação maregráfica do porto da cidade de mesmo nome, em Santa Catarina. Tal substituição ensejou uma sensível melhoria de definição do sistema de altitudes, uma vez que a estação de Imbituba contava na época com nove anos de observações, bem mais que o alcançado pela estação de Torres. O final da década de 70 marcou a conclusão de uma grande etapa do estabelecimento da Rede Altimétrica. Naquele momento, linhas de nivelamento geométrico chegaram aos pontos mais distantes do território brasileiro, nos estados do Acre e de Roraima. Após aproximadamente 35 anos de sucessivos ajustamentos manuais (1948, 1952, 1959, 1962, 1963, 1966, 1970 e 1975) das observações de nivelamento, o IBGE deu início nos primeiros anos da década de 80, a informatização dos cálculos altimétricos. Tal processo possibilitou a implantação, em 1988, do Projeto Ajustamento da Rede Altimétrica, com o objetivo de homogeneizar as altitudes da Rede Altimétrica de Alta Precisão - RAAP do SGB. Em 1993 foi concluído o Ajustamento Altimétrico Global Preliminar - AAGP, o qual corrigiu alguns problemas de ajustamentos anteriores, com a aplicação da redução pseudo-ortométrica, que trata apenas do efeito do não paralelismo das superfícies equipotenciais do campo da gravidade normal. O AAGP não foi um ajustamento simultâneo e abrangeu somente os macro circuitos da Rede Altimétrica (IBGE, 2007).

Essas medições dos RNs iniciaram a partir de nivelamento geométrico realizadas, em sua grande maioria, com níveis Wild N3, tripés rígidos e miras invar de dupla graduação, segundo os procedimentos usuais para obtenção de alta precisão (LUZ; GUIMARÃES, 2001):

- leituras das miras realizadas usualmente na seqüência natural do trabalho (esquerda e direita de ré, esquerda e direita de vante), com a alternância da mira utilizada à ré e à vante para eliminação do erro de índice;
- trabalhos de observação usualmente iniciando-se com as primeiras luzes do dia, extendendo-se até as horas em que os efeitos do aumento da temperatura começam a prejudicar a horizontalização do nível de bolha e a realização das leituras nas miras. Eventualmente os trabalhos foram também realizados nas últimas horas do dia;
- comprimento das visadas de até 100 m, sendo utilizado atualmente o limite de 60 m;
- visadas aproximadamente iguais a ré e a vante, com tolerância de 3 m para a diferença entre os somatórios de seção, para minimização dos efeitos de esfericidade e refração;
- realização manual de alguns controles de qualidade das observações, como o monitoramento da diferença entre as leituras das graduações esquerda e direita das miras;
- não realização de leituras meteorológicas para correção dos efeitos sistemáticos relacionados;
- nivelamento e contra-nivelamento usualmente feitos em seqüência, com sua diferença devendo atender à tolerância de  $4 \text{ mm km}^{-1}$  (antes de 1985) ou  $3 \text{ mm km}^{-1}$ , desde 1985; e
- confirmação da estabilidade das Referências de Nível, para conexão de novas linhas, através do renivelamento de pelo menos duas seções antigas, cujas diferenças entre desníveis novos e antigos não devem ultrapassar a mesma tolerância utilizada para a diferença do duplo nivelamento de uma seção.