



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE PLANALTINA**

FELIPPE DAMIÃO MELLO DI SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO
OBTIDOS A PARTIR DE SENSORES ORBITAIS: ESTUDO DE CASO
DA BACIA EXPERIMENTAL DO ALTO RIO JARDIM**

PLANALTINA - DF

2013

FELIPPE DAMIÃO MELLO DI SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO
OBTIDOS A PARTIR DE SENSORES ORBITAIS: ESTUDO DE CASO DA
BACIA EXPERIMENTAL DO ALTO RIO JARDIM**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Gestão Ambiental,
como requisito parcial à obtenção do título
de bacharel em Gestão Ambiental.

Orientador: Dr. Antonio Felipe Couto Júnior
Coorientador: Dr. Jorge Enoch Furquim
Werneck Lima

PLANALTINA - DF

2013

Silva, Felipe Damião Mello di
Análise Comparativa de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Sensores Orbitais: Estudo de Caso da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim / Felipe Damião Mello di Silva. Planaltina – DF, 2013. 53 f.

Monografia – Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília.
Curso de Bacharel em Gestão Ambiental
Orientador: Dr. Antonio Felipe Couto Júnior
Coorientador: Dr. Jorge Enoch Furquim Werneck Lima

1. bacia hidrográfica 2. DGPS 3. modelo digital de elevação 4. processamento digital de imagens 5. sensores orbitais. I.Silva, Felipe Damião Mello di II.
Título;

FELIPPE DAMIÃO MELLO DI SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO
OBTIDOS A PARTIR DE SENSORES ORBITAIS: ESTUDO DE CASO DA
BACIA EXPERIMENTAL DO ALTO RIO JARDIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Gestão Ambiental da Faculdade UnB Planaltina, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Gestão Ambiental.

Banca Examinadora:

Planaltina-DF, 23 de Julho de 2013.

Dr. Antonio Felipe Couto Júnior - *Campus* Planaltina (UnB)

(Orientador)

Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes - Departamento de Geografia (UnB)

(Examinador Externo)

MSc. Vinicius Vasconcelos – Departamento de Geografia (UnB)

(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho à minha família,
em especial aos meus pais, Elizia Silvane
Mello Pimenta e Marcos Antônio Pimenta Jr
os quais sempre estiveram ao meu lado em tudo e para
tudo, me apoiando, aconselhando, educando e me ajudando
a transpor todos os obstáculos presentes em minha jornada**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que iluminou meu caminho durante esta jornada e a toda minha família, que sempre esteve ao meu lado dando carinho e apoio, sem medir esforços para que eu chegasse a esta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Dr. Antonio Felipe Couto Júnior e coorientador Dr Jorge Enoch Furquim Wernech Lima, pela confiança em minha capacidade para a conclusão deste trabalho, orientação, reflexões, discussões, incentivos acadêmicos e profissionais, ensinamentos, paciência e amizade;

À Universidade de Brasília e aos professores do curso de Gestão Ambiental, em especial os professores Dr. Antonio Felipe Couto Júnior, Dr^a Mônica Nogueira, Dr^a Regina Coelly, Dr Ludgero Cardoso, Dr^a Gabriela Nardoto e Dr Irineu Tamaio pela dedicação, ensinamentos, paciência e conhecimento que me transmitiram no decorrer do curso.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), especialmente com o Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado (CPAC) em especial o pesquisador Dr Jorge Enoch Furquim Wernech Lima pela oportunidade de estágio e pelo conhecimento transmitido.

Aos amigos e colegas do curso de Gestão Ambiental da Universidade de Brasília, especialmente a Luane, Souza, Luís Augusto, Alexandre Messias, Danielle Ribeiro, Tia Dete, Wesley Souza, Seu Zé, Lucas Ferreira, Pedro Martins, Leonardo Oliveira e a todos os que fizeram parte e estiveram presentes nas diferentes fases que passei nesses quatro anos da minha vida.

Aos amigos e companheiros de Embrapa, em especial ao Carlos Alberto, Luciano, Alexandre Messias, João Paulo, Pedro Martins, Luane Souza e Leonardo Oliveira pela amizade, parceria e cumplicidade, que serão lembradas no decorrer da vida.

Gostaria de destacar meus sinceros agradecimentos à pessoa que sempre esteve ao meu lado para tudo, quase que em tempo integral nesse período, obrigado Luane

pela amizade, carinho, compreensão, ajuda, conselhos, desabafos e por todos os inúmeros momentos ímpares de minha vida que estive ao meu lado.

Agradeço aos integrantes da banca examinadora que gentilmente aceitaram o convite.

"Desenvolver força, coragem e paz interior demanda tempo. Não espere resultados rápidos e imediatos, sob o pretexto de que decidiu mudar. Cada ação que você executa permite que essa decisão se torne efetiva dentro de seu coração."

Dalai Lama

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS A PARTIR DE SENSORES ORBITAIS: ESTUDO DE CASO DA BACIA EXPERIMENTAL DO ALTO RIO JARDIM

A topografia e sua representação por meio de Modelos Digitais de Elevação ou de Terreno (MDE e MDT) são fatores importantes no entendimento da dinâmica hidrológica e ambiental. Essa representação mostra-se fundamental em alguns estudos, como, por exemplo, a caracterização da rede de drenagem, a determinação da direção do fluxo, a delimitação de bacias hidrográficas e a estimativa de erosão. Esses modelos podem ser obtidos por meio do uso de sensores orbitais e podem apresentar limitações na representatividade das irregularidades topográficas. Existem tratamentos que atenuam essas limitações e diferentes técnicas de validação dos modelos tratados. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar diferentes limiares altimétricos para o pré-processamento de modelos digitais de elevação na Bacia Experimental do Alto Rio Jardim (BEARJ). Foram utilizados dados de dois sensores orbitais, ASTER GDEM e o SRTM. A primeira etapa do pré-processamento desses dados foi a aplicação do filtro de mediana, com a janela de 7x7, e a sua posterior subtração em relação aos dados originais. Após essa aritmética, foi realizada a extração das variações altimétricas de 3, 5 e 10 metros. Esses resultados foram convertidos para o formato vetorial (pontos) e interpolados por meio do algoritmo TOPOGRID. Compararam-se as áreas de drenagem da bacia geradas pelos quatro modelos de cada sensor. Para a avaliação do efeito dos três limiares altimétricos, foi realizada a normalização dos resultados em função da média e do desvio padrão da altitude de cada modelo. Foi feita uma distribuição de frequência e realizada a espacialização dos dados, ficando visível uma suavização no relevo dos dados tratados em relação aos originais. A comparação dos dados orbitais com os de ponto de controle, determinados com o uso de DGPS (Differential Global Positioning System), deu-se por meio de dados estatísticos descritivos e do Coeficiente de Determinação (R^2). Além disso, foi realizado o enquadramento dos dados com base nas regras do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que incluem o cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ) e da tolerância vertical. As maiores diferenças encontradas entre os modelos e os pontos de controle foram observadas nos modelos que não receberam tratamento, evidenciando a importância do pré-processamento. Os modelos de ambos os satélites que receberam tratamento apresentaram pouca variação entre si, mesmo sendo empregados limiares altimétricos diferentes. No caso do sensor ASTER GDEM foi observada a seguinte sequência de exatidão: MDE 10, MDE 5, MDE 3 e MDE. Os dados do sensor SRTM seguiram a seguinte sequência de desempenho: MDE 5, MDE 3, MDE 10 e MDE. A validação de modelos é essencial para análise de tratamentos empregados. Espera-se que os tratamentos possam ser replicados para outras áreas de estudo com mesmas características e que possam servir de subsídio para diferentes estudos que necessitam de um Modelo Digital de Elevação e que visem elaboração de políticas públicas com foco na gestão dos recursos naturais.

Palavras-Chave: bacia hidrográfica, DGPS, modelo digital de elevação, processamento digital de imagens, sensores orbitais.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL ELEVATION MODELS OBTAINED FROM SENSORS ORBITAL: A CASE STUDY OF UPPER COURSE OF JARDIM RIVER EXPERIMENTAL WATERSHED

The topography representation by the Digital Elevation Models (DEM) plays an important role to understand hydrological dynamics and environmental resources spatial patterns, specially, drainage network characterization, flow direction, watershed delineation and erosion estimation. Nowadays, the orbital sensors are the main source of these data. However, the acquisition process of these data also provides digital noises that reduce the accuracy of these models. In this context, this work aimed to evaluate different elevation thresholds for preprocessing of DEM in the Upper Course of Jardim River Experimental Watershed. There were used ASTER GDEM and SRTM datasets that were submitted to median filter with a 7x7 window and subtracted by the raw data. After this arithmetic there were extracted the 3, 5 and 10 meters elevation variation. These results were converted to points and interpolated using TOPOGRID algorithm. The assessment of the elevation thresholds was performed by the standardization of the results by mean and standard deviation and by the pixel histogram frequency. This evaluation evidenced a significant smoothing in the pixels frequency of both sensors datasets. In order to evaluate the accuracy of these orbital data (ASTER GDEM and SRTM), there were used control point obtained by Differential Global Positioning System (DGPS). This evaluation considered the descriptive statistics, determination coefficient (R^2) and the Cartographic Accuracy Standards (PEC, in Portuguese) rules, which included the Root Mean Square Error (RMSE) and vertical tolerance. The major differences were observed in models that have not received preprocessing treatment, in both sensors, independent of the elevation thresholds. The accuracy of ASTER GDEM sensor was higher in the 10-meters, 5-meters and 3-meters DEM; and the SRTM sensor, 5-meters, 3-meters and 10-meters DEM. The difference between the two sensors is owing to the spatial resolution. From these results it is possible to state that the preprocessing method is fundamental to the relief representation in the Cerrado biome. These results should provide accurate data for hydrological and environmental studies that should influence the public policy and natural resources management.

Keywords: watershed, control points, digital elevation model, image processing, orbital sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.	19
Figura 2 - Metodologia empregada no pré-processamento dos Modelos Digitais de Elevação.....	21
Figura 3 - Tratamento empregado nos Modelos Digitais de Elevação.	22
Figura 4 - Delimitação automática da área de drenagem.....	24
Figura 5 - Metodologia empregada para comparação dos dados dos Modelos Digitais de Elevação com dados de DGPS.	25
Figura 6 - Esquema do levantamento de dados utilizando DGPS (LIMA, 2010).	26
Figura 7 - Limite da BEARJ com pontos de DGPS alocados.	26
Figura 8 - Distribuição de frequência das diferenças altimétricas padronizadas dos modelos ASTER GDEM.	31
Figura 9 - Distribuição de frequência das diferenças altimétricas padronizadas dos modelos SRTM.....	32
Figura 10 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na chapada geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor ASTER.	34
Figura 11 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na chapada geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor SRTM.	35
Figura 12 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na depressão geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor ASTER.	37
Figura 13 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na depressão geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor SRTM.	38
Figura 14 - Área de drenagem da BEARJ obtida por meio dos Modelos Digitais de Elevação original e tratados do sensor ASRER GDEM.	39
Figura 15 - Área de drenagem da BEARJ obtida por meio dos Modelos Digitais de Elevação original e tratados do sensor SRTM.	40
Figura 16 - Dispersão dos dados ASTER GDEM e DGPS.....	43
Figura 17 - Dispersão dos dados SRTM e DGPS.	44
Figura 18 - Erro médio quadrático dos modelos em relação aos pontos de controle.	45
Figura 19 - Tolerância vertical dos dados ASTER GDEM x DGPS.	46
Figura 20 - Tolerância vertical dos dados SRTM x DGPS.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados altimétricos dos pontos de controle obtidos com o uso do DGPS (LIMA, 2010).....	27
Tabela 2 - Principais regras do padrão de exatidão cartográfico para as escalas de 1: 50.000 e. 1: 100.000.	29
Tabela 3 - Dados estatísticos descritivos usados na padronização dos dados altimétricos.	30
Tabela 4 - Média, desvio padrão (dp), soma do quadrado do erro (SQE), grau de liberdade da amostra (gl) da comparação entre os modelos e o DGPS.	42
Tabela 5 - Erro padrão (EP) e o enquadramento no PEC, referente à comparação de cada modelo com os dados do DGPS.	47

SUMÁRIO

RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
SUMÁRIO.....	XII
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. JUSTIFICATIVA.....	16
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	16
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	17
1.3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2. ÁREA DE ESTUDO.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	21
3.1.1. <i>Aquisição dos Modelos Digitais de Elevação</i>	21
3.1.2. <i>Pré-processamento e geração dos Modelos Digitais de Elevação tratados</i>	22
3.1.3. <i>Análise da estatística descritiva, Padronização e Espacialização dos</i> <i>dados</i>	23
3.1.4. <i>Delimitação automática da bacia</i>	23
3.2. COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DADOS DE DGPS.....	25
3.2.1. <i>Aquisição de dados</i>	25
3.2.1.1 DGPS.....	25
3.2.1.2 Dados dos Modelos Digitais dos Sensores ASTER GDEM e SRTM...27	
3.2.2. <i>Análise estatística e comparação dos dados</i>	28
3.2.2.1. Coeficiente de Determinação.....	28
3.2.2.2. Erro Médio Quadrático (EMQ), tolerância vertical e Erro Padrão (EP)	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	30
4.1.1 <i>Análise da estatística descritiva e distribuição de frequência dos dados</i> <i>padronizados</i>	30

4.1.2 Espacialização dos dados padronizados dos modelos digitais do ASTER GDEM e SRTM na região de chapada da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim	33
4.1.3 Espacialização dos dados padronizados do ASTER GDEM e SRTM na região de depressão da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim	36
4.1.4 Resultados do tratamento dos Modelos Digitais de Elevação ASTER GDEM e SRTM.....	38
4.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DADOS DE DGPS	41
4.2.1. Estatística descritiva e Coeficiente de determinação.....	41
4.2.2. Erro Médio Quadrático (EMQ), tolerância vertical e Erro Padrão (EP) ..	45
5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro com cerca de 2.000.000 Km², correspondendo a 24% do território nacional e cobrindo 11 unidades da federação (IBGE, 2004). Esse bioma possui a maior biodiversidade e heterogeneidade de paisagens entre as savanas do mundo, embora crescentemente ameaçadas pela expansão agrícola (SILVA; BATES, 2002).

Esse domínio da natureza mostra-se relacionado com a produção e distribuição de recursos hídricos de oito das doze grandes regiões hidrográficas brasileiras (LIMA; SILVA, 2007): Amazônica, Tocantins - Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, São Francisco, Atlântico Leste, Paraná e Paraguai.

As atividades de uso e manejo do solo, proteção de nascentes, infraestrutura e sistemas viários entre outros, devem ser elaborados em consonância com as características das bacias hidrográficas em que vão ser implantadas, por essa ser utilizada como a principal unidade de gestão territorial, de acordo com a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH).

Com o aparecimento e desenvolvimento de novas tecnologias, podemos destacar a geotecnologia, que possibilita a obtenção de informações da superfície terrestre referenciadas espacialmente, onde se destaca o sensoriamento remoto, que utiliza sensores orbitais para a obtenção das informações sistemáticas sobre os alvos terrestres, subsidiando os estudos relacionados à gestão de recursos naturais. Nesse sentido, os dados obtidos por meio de sensores orbitais podem ser utilizados para a representação numérica da superfície terrestre, ou seja, do relevo. Esses dados são denominados Modelos Digitais de Elevação (MDE).

A topografia e sua representação por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE) mostram-se fundamentais para o entendimento do funcionamento da paisagem, especialmente em estudos hidrológicos e gestão de recursos naturais. Sendo assim, um MDE é base para uma série de estudos, como: realização de programas de manejo de bacias hidrográficas, eletrificação rural, conservação de solos, preservação de recursos florestais, cumprimento do código de florestal,

gestão dos recursos hídricos, planejamento territorial, implantação de estradas rurais, melhoria da cartografia topográfica disponível, zoneamento ecológico – econômico, monitoramento ambiental, dentre outros (EMBRAPA, 2012).

Dentre as principais utilizações em estudos hidrológicos, destacam-se a caracterização da rede de drenagem, a identificação da direção do fluxo, a delimitação de bacias hidrográficas, a estimativa do potencial de erosão hídrica e a definição de zonas passíveis de inundação ou de deslizamento de massa.

O processo para a geração do Modelo Digital de Elevação consiste, basicamente, em três etapas: 1) aquisição de dados; 2) edição dos dados; 3) geração do modelo. Um MDE é composto por informações tridimensionais, apresentando latitude, longitude e altimetria (x, y e z) e sua aquisição pode ocorrer por digitalização, restituição fotogramétrica, sensoriamento remoto ou levantamento direto em campo (INPE, 2004).

No caso dos dados oriundos de sensores orbitais, são observadas limitações intrínsecas do próprio sistema de aquisição e geração do modelo. Essas limitações devem ser minimizadas no intuito de representar a superfície terrestre de forma mais precisa, possibilitando a melhor compreensão da paisagem. Nesse sentido, torna-se relevante o desenvolvimento de tratamentos e correções para a modelagem do relevo por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), além de sua integração com outras informações espaciais (VALERIANO, 2004).

Dentre os principais tratamentos para a minimização desses ruídos em dados orbitais, destaca-se a aplicação de filtragem espacial e reinterpolação do Modelo Digital de Elevação (PINTO *et al*, 2000; MENKE *et al*, 2007). Esses autores utilizaram filtro de mediana para atenuar os efeitos das variações altimétricas dos elementos dominantes na superfície, indicando limiares para o tratamento dos dados originais.

Para o aumento da precisão dos dados tratados, são utilizados dados de campo no intuito de validar os MDE's gerados. Nesse processo, é necessária a aquisição de pontos de controle com alta precisão, como aqueles obtidos por meio

de Global Position System (GPS) ou GPS Diferencial. Esse último apresenta maior precisão, mesmo em relevo movimentado, o qual apresentam maiores variações quando validados por meios menos precisos (BARROS, *et al.* 2005).

A qualidade da correção dependerá, dentre outros fatores, da precisão com que estes pontos foram adquiridos, de sua distribuição sobre a imagem e da perfeita marcação dos mesmos na imagem (BARROS, *et al.* 2005)

1.1. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho está inserido no escopo de aperfeiçoar os usos dos recursos hídricos e mitigar os conflitos, por meio da estruturação de bases hidrológicas consistentes. Neste sentido, a utilização de dados orbitais favorece a obtenção de informações sistemáticas da superfície terrestre.

O presente trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Alto Rio Jardim, considerada uma bacia experimental com uso agrícola (LIMA *et al.*, 2008). Ela abriga diversos níveis de utilização da terra, desde agricultura de subsistência até culturas mecanizadas, além de diferentes tipos de sistemas de produção. Essa diversidade de usos da terra mostra-se relacionada a conflitos entre os usuários da bacia pela utilização da água, especialmente na época seca, período de maior restrição hídrica.

Destaca-se que este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projetos SWAT-DF (CNPq), GEOCERRADO (Embrapa) e REHIDRO-Bacias Experimentais (FINEP/CT-Hidro), sob a coordenação da Embrapa Cerrados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Gerar Modelos Digitais de Elevação consistentes para apoio a estudos hidrológicos em bacia experimental do Cerrado.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Comparar diferentes limiares altimétricos no pré-processamento de MDE de diferentes sensores orbitais referente à Bacia Experimental do Alto Rio Jardim (BEARJ).
- ✓ Avaliar as relações entre os dados extraídos de sensores orbitais e dados de campo para a geração do MDE da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim (BEARJ).

1.3. REFERENCIAL TEÓRICO

Durante muitos anos, a técnica clássica utilizada para a representação de relevo foi por meio de curvas de nível, traçadas manualmente a partir de coordenadas tridimensionais obtidas por meio de levantamento topográfico. Os valores intermediários eram obtidos por interpolação linear, porém com o avanço da tecnologia na área de informática e de técnicas de geoprocessamento, tornou-se possível a descrição e a representação matemática do terreno por meio de diferentes interpoladores, utilizando variados métodos de obtenção de dados.

Para gerar um MDE podem ser utilizados dados topográficos obtidos em levantamentos de campo, técnicas de estereoscopia em fotografias aéreas ou imagens de satélites, ou cartas topográficas (WOLF, 1983; ACKERMANN, 1996).

Um MDE deve representar adequadamente as feições do modelado topográfico, as linhas de cumeada e os talwegues, caracterizando de forma mais fiel possível o terreno (MAUNE, 1996; ACKERMANN, 1996).

A aquisição de dados de sensores orbitais apresentam limitações associadas às interferências atmosféricas ou instrumentais. Dessa forma, sua utilização requer o emprego de tratamentos para que seja viável sua integração com outros planos de informações. Após o pré-tratamento, uma avaliação dos dados quanto ao seu potencial e limitações é oportuna antes da integração em modelos mais complexos, para que se possa estimar a precisão geral dos resultados finais de cada estudo (VALERIANO, 2004).

Nesse contexto, várias metodologias têm sido desenvolvidas com intuito de se construir modelos digitais de terreno que representem a superfície terrestre de forma mais fidedigna. Os erros encontrados nos modelos digitais de elevação são em geral, função do método de obtenção dos dados utilizados e do tipo de modelagem utilizada em sua confecção.

De acordo com Barros *et al.* (2005), a correção de modelos digitais pode ser efetuada por meio de pontos de controle obtidos com técnicas de maior precisão, sendo o uso do DGPS (GPS Diferencial) indicado para esse levantamento.

Marín *et al.* (2005), por exemplo, utilizando cotas elipsoidais obtidas com DGPS em levantamentos rápidos, ou seja, com pequeno tempo de permanência nos pontos de controle, concluiu que o erro vertical máximo verificado com essa técnica foi de 60 cm, o que poderia ser reduzido para menos de 10 cm caso a permanência no ponto fosse superior a 30 minutos.

O conceito de bacia hidrográfica segundo Christofolletti (1980), diz que os limites da bacia hidrográfica devem corresponder aos limites topográficos, sendo uma linha imaginária ligando os pontos mais elevados do terreno, cruzando a drenagem em um único ponto, denominada de exutório.

De acordo com a Lei Federal nº 9.433/1997 a bacia hidrográfica é a unidade de gestão para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (BRASIL, 1997).

Engman (1996) afirma que o gerenciamento integrado dos recursos hídricos depende da disponibilidade de dados adequados para a construção e validação de modelos representativos dos processos hidrológicos.

Os problemas ambientais relacionados aos recursos hídricos têm aumentando a demanda por estudos e ações que visam à adequada gestão ambiental. Uma alternativa para minimizar o problema de falta de dados e informações para a realização de estudos hidrológicos é o uso de ferramentas de

modelagem que vêm sendo cada vez mais utilizadas para a aplicação dos mais diversos tipos de modelo, por exemplo, os erosivos (MOORE *et al.*, 1988; DIETRICH *et al.*, 1993), de zonas de saturação na paisagem (O LOUGHLIN, 1986), de predição a movimentos de massa (OKIMURA; ISHIKAWA, 1985; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998), entre outros.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Experimental do Alto Rio Jardim (BEARJ) localiza-se na porção leste do Distrito Federal, entre as latitudes 15,71° e 15,86° S e as longitudes 47,55° e 47,64° W. Esta bacia abrange uma área de drenagem de aproximadamente 105 km², sendo composta por dois rios principais, o Estanislau e o Jardim (Figura 1).

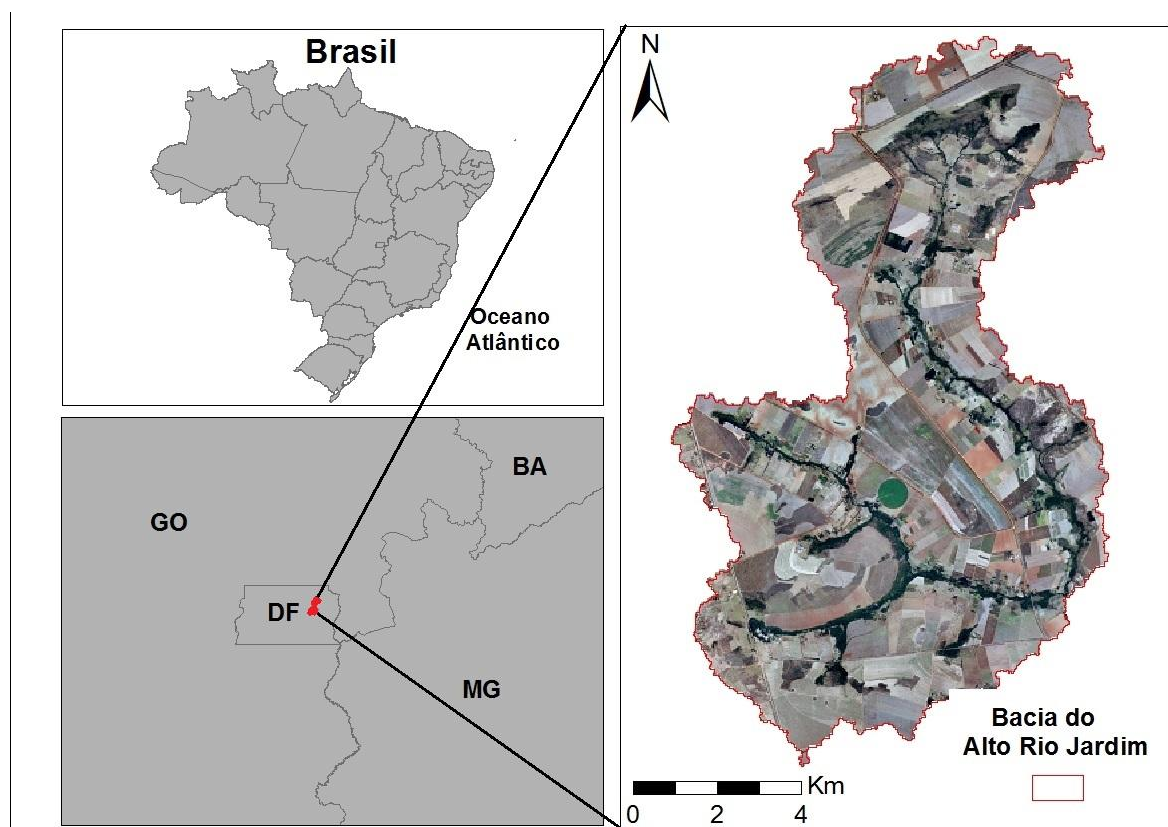


Figura 1 - Localização da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

A área de estudo faz parte da região hidrográfica do São Francisco, sendo o rio Jardim afluente do rio Preto, que deságua no rio Paracatu, importante tributário do rio São Francisco. (DOLABELLA, 1996)

Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo “Tropical de Savana”, típico da região de Cerrado, caracterizado por duas estações bem definidas (CODEPLAN, 1984): verão chuvoso e inverno seco. Em termos de totais anuais, a precipitação média na área varia entre 1.000 mm a 1.700 mm, sendo que mais de 80% da chuva, em média, ocorre entre os meses de outubro e março.

A hidrogeologia é constituída em seu domínio poroso, pelos sistemas P1, P2 e P4. O domínio fraturado é composto pelos sistemas Paranoá (subsistemas Q3/R3 e R4), Canastra (subsistema F) e Bambuí (FREITAS; CAMPOS, 1998).

A maior parte do solo da bacia (76,38%) é composta por Latossolos, 16,68% é de Cambissolos e o restante é repartido entre as classes Plintossolo (2,54%), Gleissolo (2,41%), Neossolo Quartzarênico (2,09%) e, ainda, uma pequena parcela de Afloramentos de Rocha (0,24%) (adaptado de REATTO *et al.*, 2000)

As formas de relevo predominantes nesse tipo de solo são as chapadas, que representam um tipo de topografia plana a suave ondulada. Nesses solos é feito o cultivo de culturas anuais que utilizam alto nível tecnológico e que também são utilizados diferentes sistemas de manejo agrícola.

O manejo inadequado do solo pode causar graves danos ao meio ambiente, um exemplo bastante claro é o desmatamento, que leva à formação de erosão, a qual é intensificada pela chuva que ao tocar o solo desprotegido, arrasta partículas para os pontos mais baixos da bacia, gerando o carreamento da camada fértil do solo e o assoreamento dos cursos d’água, afetando sua qualidade (SPERA *et al.*, 2002).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais e métodos foi dividido basicamente em duas partes por conta de sua extensão e para facilitar a compreensão. A primeira etapa consiste basicamente no pré-processamento dos Modelos Digitais de Elevação e a segunda é referente à comparação dos dados desses modelos com dados de DGPS.

3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Essa etapa do trabalho seguiu o seguinte fluxograma (Figura 2):

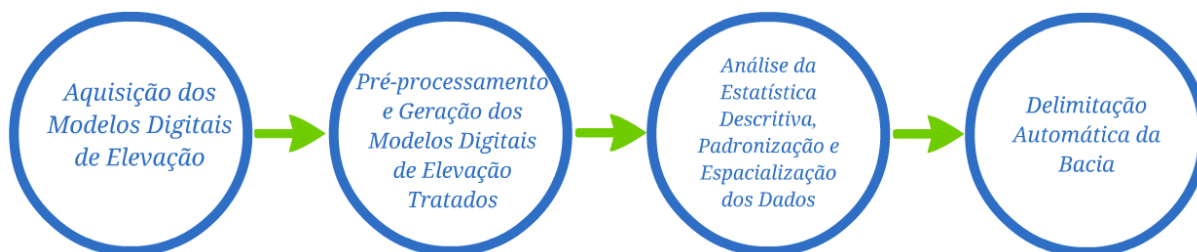


Figura 2 - Metodologia empregada no pré-processamento dos Modelos Digitais de Elevação.

3.1.1. Aquisição dos Modelos Digitais de Elevação

A primeira etapa deste trabalho foi à aquisição dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) dos sensores *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM) e Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Os dados ASTER GDEM foram gerados por meio de operação conjunta entre a NASA e o Ministério japonês de Economia, Comércio e Indústria (METI). Esses dados possuem resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pela página eletrônica: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>, gratuitamente. A área de estudo corresponde a uma única folha/cena, sendo esta a ASTGTM2_S16W048.

SRTM foi uma missão topográfica por radar interferométrico, desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) dos Estados Unidos no ano 2000. Adquiriu dados topográficos de 80% da superfície da terra entre as latitudes 60° N e 57° S em apenas 11 dias no ano 2000 (RABUS *et al.*, 2003). Possui resolução espacial de aproximadamente 90 metros e está disponível no site da Embrapa Monitoramento por Satélite: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/>, a folha/cena que engloba a área de estudo corresponde a SD-23-Y-C.

A imagem SRTM utilizada no trabalho é a terceira versão dos dados, resultante do tratamento que usou os dados originais disponibilizados pelo USGS

Eros Data Center (United States Geological Survey) conjuntamente com os modelos digitais de elevação da América do Sul derivados do SRTM e pós-processados pela FAO/UNEP (Food Agriculture Organization/United Nations Environment Programme), no âmbito do programa GLCN (Global Land Cover Network).

3.1.2. Pré-processamento e geração dos Modelos Digitais de Elevação tratados

O tratamento aplicado pode ser observado na figura 3:

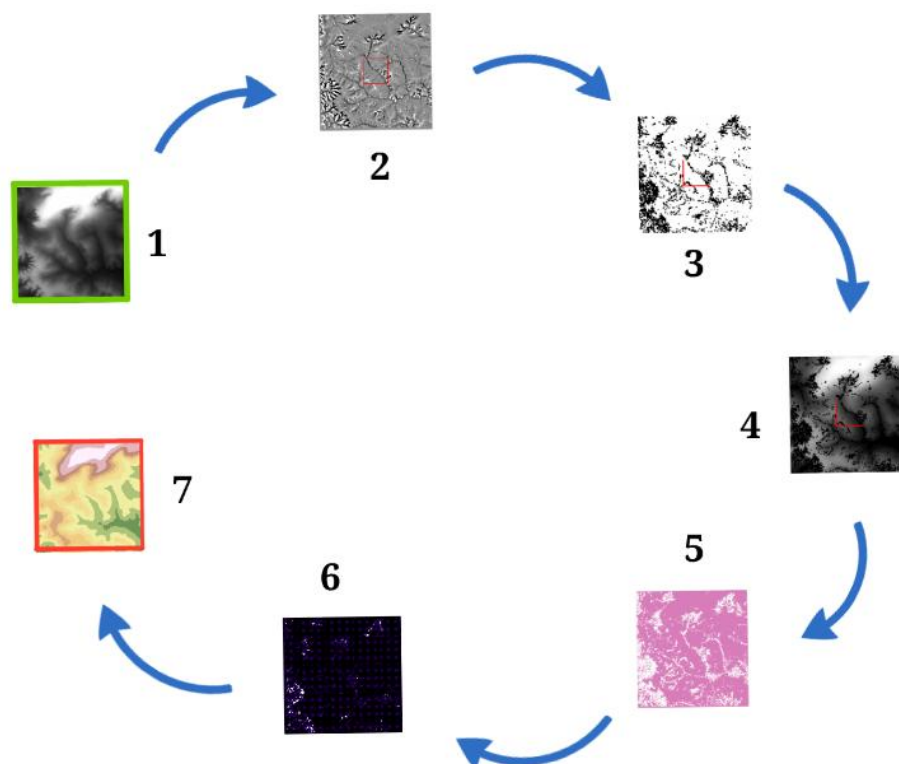


Figura 3 - Tratamento empregado nos Modelos Digitais de Elevação.

Na figura 3 podemos observar as seguintes etapas: 1) filtragem das imagens originais com filtro de mediana com janela 7x7; 2) subtração entre os dados originais e filtrados; 3) criação da máscara identificando as variações superiores a 3, 5 e 10 metros, estes limiares foram escolhidos para podermos analisar qual representaria de forma mais fidedigna o relevo do bioma cerrado, mais precisamente a ecoregião do planalto central; 4) aplicação da máscara; 5) Exclusão dos valores superiores aos limiares empregados; 6) conversão desses valores matriciais em formato vetorial de

ponto; 7) interpolação efetuada por meio do algoritmo TOPOGRID (HUTCHINSON, 1989) e geração dos três Modelos Digitais de Elevação para cada sensor e referente a cada um dos limiares de variação altimétrica avaliados, obtendo assim MDE3 ASTER, MDE5 ASTER e MDE10 ASTER, referentes ao sensor ASTER GDEM e MDE3 SRTM, MDE5 SRTM e MDE10 SRTM referentes ao sensor SRTM.

3.1.3. Análise da estatística descritiva, Padronização e Espacialização dos dados

Primeiramente foi realizada análise da estatística descritiva da altimetria de cada modelo referente às diferenças altimétricas.

No intuito de proceder à avaliação dos modelos, os dados obtidos (modelos digitais originais e interpolados) foram padronizados pela média e o desvio padrão, de acordo com a seguinte equação (SILVA *et al.*, 2013):

$$\Delta_p = \frac{h_i - \bar{h}}{d_p} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

Δ_p = padronização das diferenças entre cotas altimétrica em relação à cota média;

h_i = cota altimétrica em cada pixel i ;

\bar{h} = cota altimétrica média de todos os pixels do modelo;

d_p = desvio padrão das cotas altimétricas de todos os pixels do modelo.

Em seguida foi feita análise da distribuição de frequências e espacialização dos dados padronizados para cada modelo. A espacialização foi feita com os dados padronizados com o intuito de sabermos aonde essas variações ocorriam e descobriremos algum padrão de distribuição.

3.1.4. Delimitação automática da bacia

Para a delimitação automática da bacia foi seguido o seguinte fluxograma (Figura 4):

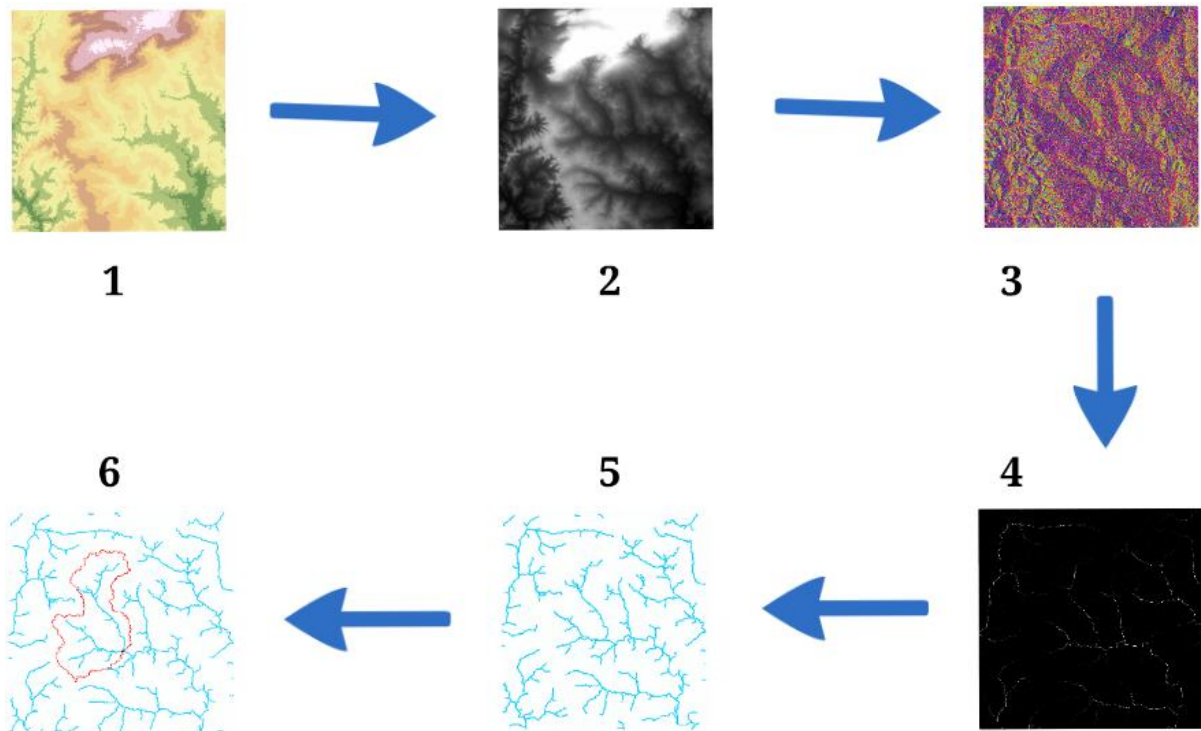


Figura 4 - Delimitação automática da área de drenagem.

Todos os oito Modelos Digitais de Elevação foram submetidos às seguintes etapas (Figura 4) para a delimitação automática da área de drenagem: 1) imagens original e tratada; 2) preenchimento de depressões, com o intuito de minimizar as falhas que comprometem o fluxo da drenagem; 3) na confecção da área de contribuição foi utilizado o método D8, onde a área de contribuição de um pixel é repassada integralmente para o pixel subjacente de menor valor, de forma direcional (O'CALLAGHAN ; MARK, 1984); 4) cálculo do fluxo acumulado a partir da direção do fluxo, determinado com base no número de pixels que estão contribuindo para a geração da drenagem a montante de um determinado ponto; 5) conversão da drenagem para o formato matricial; 6) definição do exutório da bacia, considerada neste trabalho cerca de 50 metros a jusante da confluência entre os rios Jardim e Estanislau, a partir dessas etapas ocorreu a geração automática dos limites da bacia.

3.2. COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DADOS DE DGPS

Os procedimentos metodológicos empregados seguiram as seguintes etapas (Figura5):

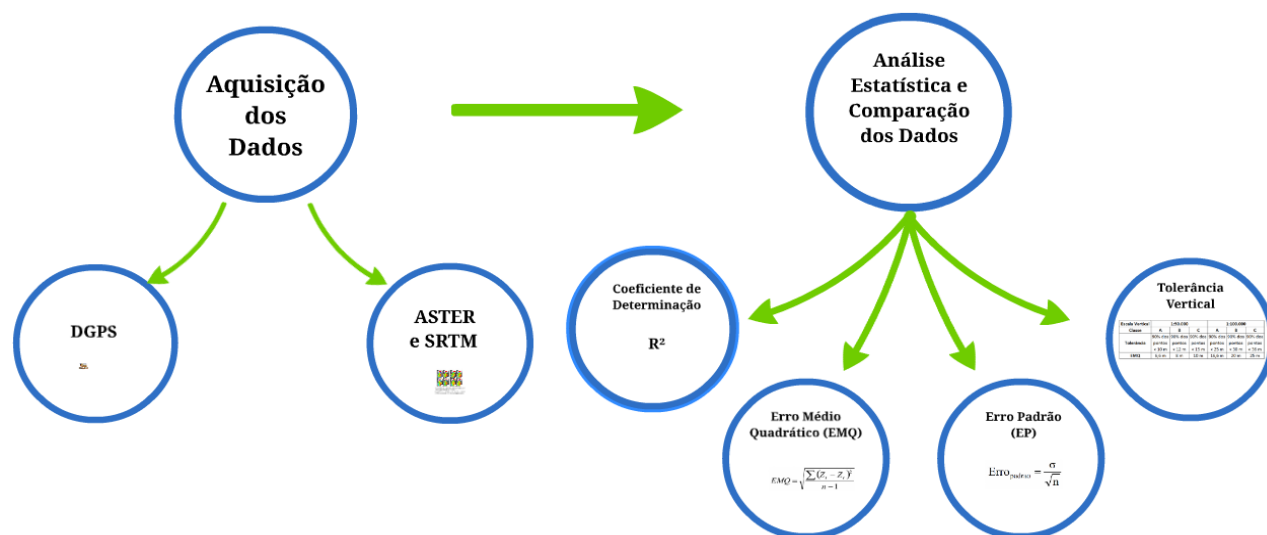


Figura 5 - Metodologia empregada para comparação dos dados dos Modelos Digitais de Elevação com dados de DGPS.

3.2.1. Aquisição de dados

3.2.1.1 DGPS

Os dados de DGPS foram coletados da tese de doutorado de Jorge Enoch Furquim Werneck Lima intitulada “Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no cerrado”, realizada no ano de 2010 no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (LIMA, 2010).

O levantamento das cotas reais em determinados pontos na Bacia Experimental do Alto Rio Jardim, foi feito por meio do método DGPS, utilizando o equipamento Leica® GX1230 com receptor GPS de dupla frequência (L1 e L2) e correção diferencial em tempo real (RTK). Os dados medidos em campo nessa estação foram corrigidos e georreferenciados em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) do IBGE (LIMA, 2010; LIMA; SILVA, 2013).

O esquema geral do levantamento efetuado com a técnica GPS Diferencial é apresentado na figura 6.

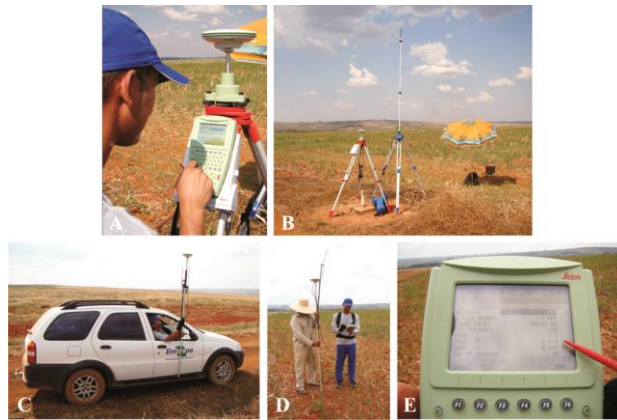


Figura 6 - Esquema do levantamento de dados utilizando DGPS (LIMA, 2010).

A figura 7 mostra o mapa do limite da BEARJ com os locais onde os pontos foram coletados, onde podemos visualizar a distribuição espacial dos pontos de controle.

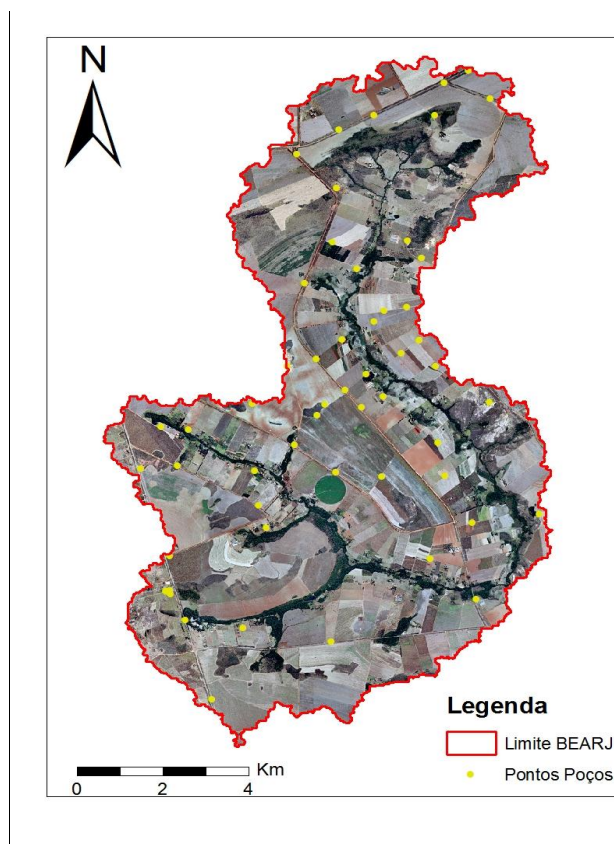


Figura 7 - Limite da BEARJ com pontos de DGPS alocados.

Os dados obtidos por meio do DGPS e corrigidos em relação à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Dados altimétricos dos pontos de controle obtidos com o uso do DGPS (LIMA, 2010).

PONTO DE CONTROLE	ALT. ELIPSOIDAL (m)	PONTO DE CONTROLE	ALT. ELIPSOIDAL (m)	PONTO DE CONTROLE	ALT. ELIPSOIDAL (m)
55	1142,00	1005	1031,00	33	962,00
11	1147,00	1004	1037,00	18	953,00
57	1153,00	1003	1035,00	17	973,00
1	1125,00	1002	1034,00	49	990,00
12	1158,00	6	1064,00	3	973,00
56	1153,00	59	984,00	13	1005,00
50	1141,00	41	1007,00	46	1074,00
47	1020,00	1006	977,00	J1	985,00
4	1034,00	42	1013,00	J2	1001,00
16	1005,00	5	1044,00	J3	978,00
52	988,00	22	1001,00	J4	957,00
38	973,00	44	982,00	J5	1010,00
26	958,00	36	1038,00	J6	952,00
27	915,00	20	980,00	J7	974,00
31	979,00	37	1035,00	J8	996,00
30	970,00	10	999,00	J9	1003,00
8	1051,00	40	1001,00	Guido	985,00
54	1000,00	24	960,00	Trentin	992,00
1001	1040,00	25	945,00		

O erro médio absoluto representa o desvio médio absoluto das repetições de medidas realizadas no ponto em relação à média, sendo que o maior erro médio absoluto obtido entre as medições altimétricas em um mesmo ponto foi de cerca de 9,0 cm. O valor do erro médio dessas medições foi de apenas 2,5 cm, o que representa um excelente indicativo da qualidade dos dados medidos em campo com o DGPS.

3.2.1.2 Dados dos Modelos Digitais dos Sensores ASTER GDEM e SRTM

Os dados altimétricos foram extraídos dos Modelos Digitais de Elevação originais e dos que receberam tratamento de ambos os satélites, ASTER GDEM e

SRTM. Vale ressaltar que os dados foram extraídos dos Modelos antes de serem padronizados, processo que objetivou identificar um padrão de espacialização dos dados.

A extração ocorreu a partir de cada modelo gerado, em que os pontos extraídos para comparação foram determinados a partir da coleta dos pontos de controle do DGPS nos proporcionando uma comparação ponto a ponto. Ao final do processo obtivemos uma planilha com os dados dos 56 pontos referentes a cada um dos oito modelos digitais: MDE ASTER (original), MDE3 ASTER, MDE5 ASTER e MDE10 ASTER, referentes ao sensor ASTER GDEM e MDE SRTM (original), MDE3 SRTM, MDE5 SRTM e MDE10 SRTM referentes ao sensor SRTM.

Outro ponto que deve ser explicitado é que os dados altimétricos extraídos estão no mesmo sistema de coordenadas e projeção (WGS84 - UTM23) que os dados obtidos pelo DGPS para realização das análises e comparações dos dados.

3.2.2. Análise estatística e comparação dos dados

3.2.2.1. Coeficiente de Determinação

O primeiro teste estatístico realizado foi o de Coeficiente de Determinação (R^2), que indica o quanto a variação de uma determinada variável independente (pontos dos modelos) explica a variabilidade da variável dependente (pontos dos poços).

3.2.2.2. Erro Médio Quadrático (EMQ), tolerância vertical e Erro Padrão (EP)

Baseado no Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) (BRASIL, 1984), a primeira etapa para determinação do modelo com melhor desempenho foi o cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ), tolerância vertical e Erro Padrão (EP) das altitudes encontradas para cada modelo para os valores altimétricos dos pontos de controle.

O EMQ foi definido através da seguinte fórmula:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_t)^2}{n - 1}} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

EMQ= Erro médio quadrático;

Z_i= o valor altimétrico do MDE;

Z_t= o valor do ponto de controle

n= número total de pontos de controle

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

A tolerância vertical foi feita de forma simplificada, calculadas as porcentagens dos pontos que apresentaram uma variação (modelo x DGPS) menor do que requerido no enquadramento do PEC.

As principais regras do PEC estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Principais regras do padrão de exatidão cartográfico para as escalas de 1: 50.000 e 1: 100.000.

Escala Vertical	1:50.000			1:100.000		
	A	B	C	A	B	C
Tolerância	90% dos pontos < 10 m	90% dos pontos < 12 m	90% dos pontos < 15 m	90% dos pontos < 25 m	90% dos pontos < 30 m	90% dos pontos < 36 m
EMQ	6,6 m	8 m	10 m	16,6 m	20 m	25 m

Segundo Banzatto e Kronka (2006), para avaliação altimétrica, o Erro Padrão (Eq. 3) dá uma noção da precisão com que foi estimada a média da amostra. Quanto menor for erro padrão da média, melhor será a estimativa da média.

$$\text{Erro}_{\text{padrao}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

σ = desvio padrão dos erros;

n= tamanho da amostra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão são apresentados em duas etapas como na metodologia, onde na primeira parte são apresentados os resultados e discussão referente ao pré-processamento dos Modelos Digitais de Elevação e a segunda parte referente à comparação dos dados desses modelos com dados de DGPS.

4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

4.1.1 Análise da estatística descritiva e distribuição de frequência dos dados padronizados

A análise da estatística descritiva dos dados altimétricos dos modelos digitais ASTER e SRTM apresentou pouca variação entre os modelos de uma forma geral. Na tabela 3 podemos observar a altimetria máxima e mínima, amplitude, média e desvio padrão os quais foram usados na padronização dos dados dos modelos digitais.

Tabela 3 - Dados estatísticos descritivos usados na padronização dos dados altimétricos.

	MDE ASTER	MDE3 ASTER	MDE5 ASTER	MDE10 ASTER
Máximo	1201	1185	1188	1190
Mínimo	904	905	906	906
Amplitude	297	280	282	284
Média	1011	1011	1011	1011
Desvio Padrão	63	63	63	63

	MDE SRTM	MDE3 SRTM	MDE5 SRTM	MDE10 SRTM
Máximo	1181	1181	1181	1181
Mínimo	910	915	912	910
Amplitude	271	266	269	271
Média	1014	1014	1013	1013
Desvio Padrão	63	63	63	63

Os histogramas de frequência dos valores padronizados apresentam no eixo Y as Distribuições de Frequências enquanto que no eixo X apresentam as Diferenças Altimétricas Padronizadas. Os histogramas dos modelos ASTER foram apresentados na figura 8.

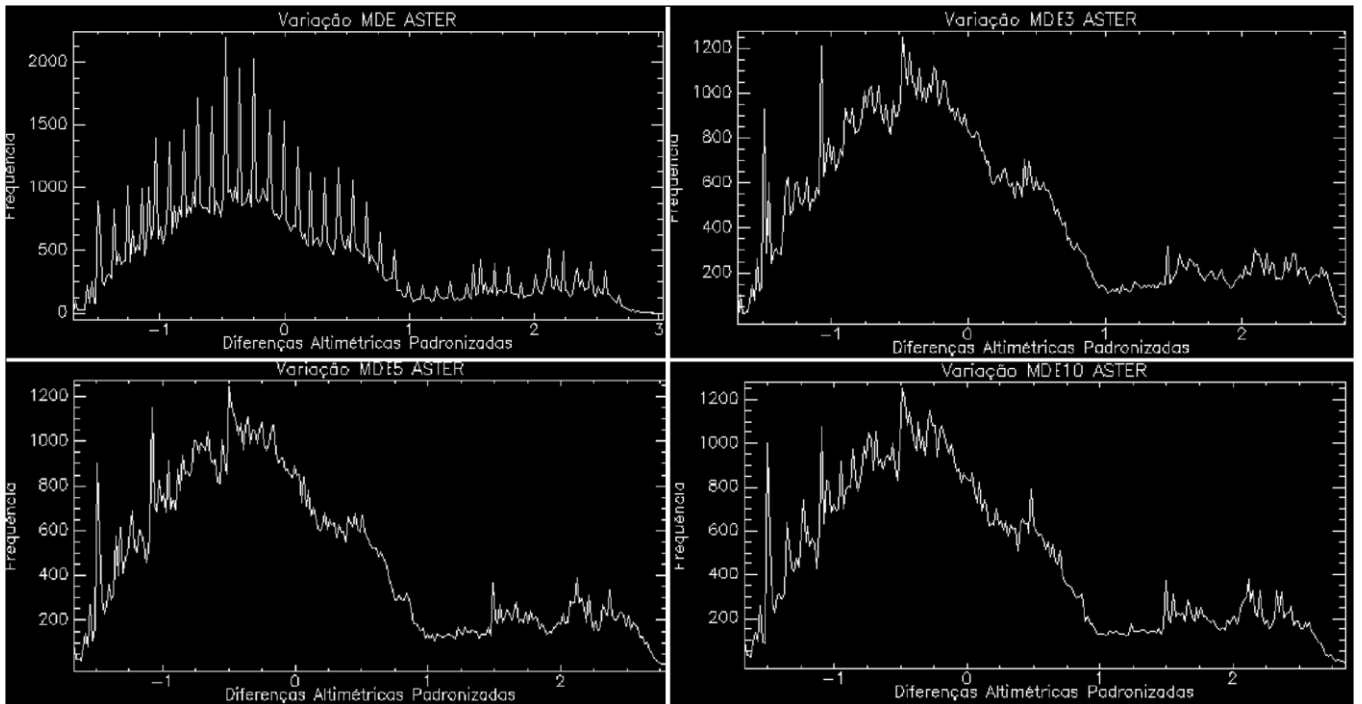


Figura 8 - Distribuição de frequência das diferenças altimétricas padronizadas dos modelos ASTER GDEM.

No eixo Y fica visível uma redução na amplitude da frequência nos modelos que receberam tratamento devido à interpolação dos pixels que apresentaram variação altimétrica maior que os limiares empregados, gerando uma distribuição mais homogênea.

Já no eixo X observou-se que a maior Diferença Altimétrica Padronizada ocorreu no MDE ASTER, com os dados variando entre 3,031781 e -1,696138, os demais modelos apresentaram a seguinte variação:

- MDE3 ASTER: 2,770314 a -1,683281;
- MDE5 ASTER: 2,806558 a -1,669762; e
- MDE10 ASTER: 2,843444 a -1,676240.

Os histogramas de frequência dos valores padronizados dos modelos SRTM seguiram o mesmo padrão aplicado no ASTER GDEM e estão apresentados na figura 9.

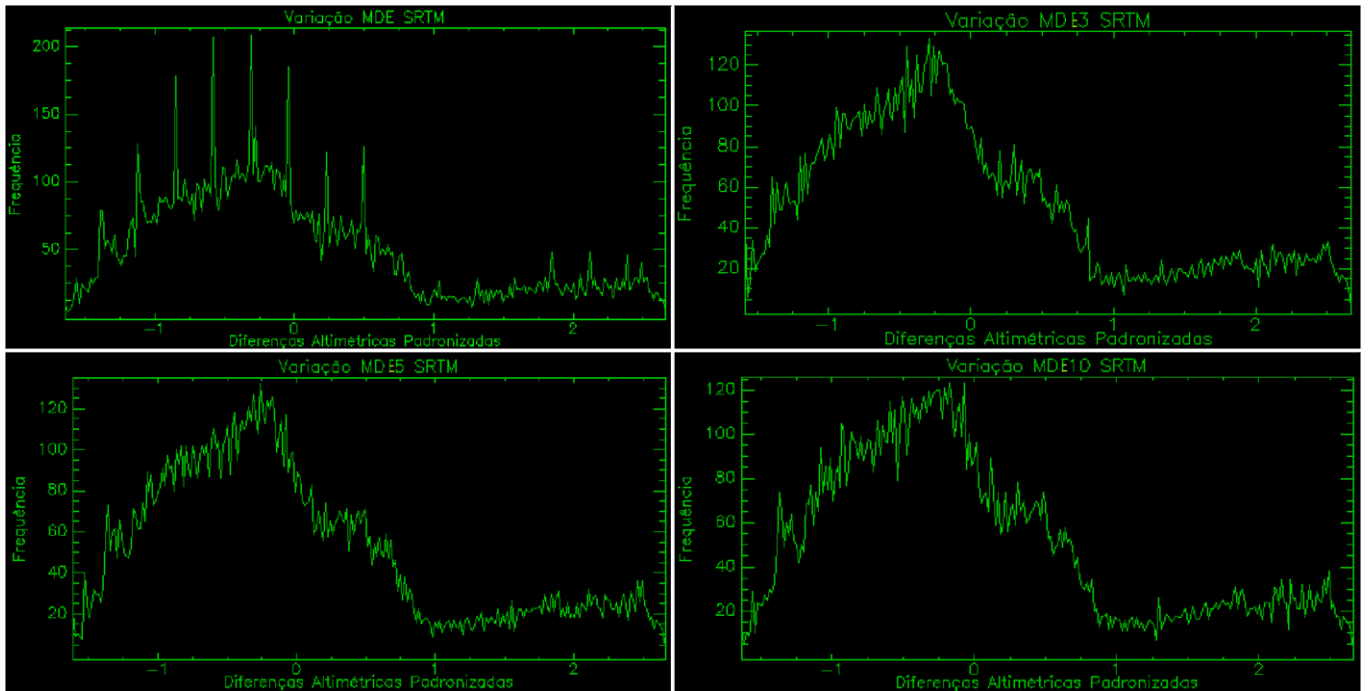


Figura 9 - Distribuição de frequência das diferenças altimétricas padronizadas dos modelos SRTM.

As variações ocorridas nos histogramas SRTM seguiram o mesmo padrão observado no ASTER GDEM, apresentando redução na frequência devido à interpolação dos pixels pela média dos vizinhos e as Diferenças Altimétricas Padronizadas apresentaram as seguintes variações:

- MDE SRTM: 2,660409 a -1,645007;
- MDE3 SRTM: 2,669894 a -1,578920;
- MDE5 SRTM: 2,661149 a -1,616437; e
- MDE10 SRTM: 2,660942 a -1,638859.

Os dados dos modelos digitais interpolados variaram menos, tanto na frequência, quanto na diferença altimétrica padronizada em relação ao modelo digital original em ambos os satélites, ficando evidente o efeito da suavização obtida por meio do filtro de mediana e dos diferentes limiares avaliados.

Nos picos das curvas podemos observar facilmente o efeito da suavização, onde nos dados originais essas curvas são apresentadas de formas bastante acentuadas, enquanto que nos dados tratados elas são suavizadas e em alguns pontos nem aparecem.

O eixo Y do SRTM variou menos do que o do ASTER GDEM devido à escala. Ao analisarmos o eixo X dos histogramas de ambos os satélites podemos observar que a maior distribuição de frequência se encontra entre o -1 e 0 devido à padronização se dar pela média e desvio padrão, o que mostra que a maior porcentagem da área da BEARJ se encontra abaixo da média, ou seja, na depressão. Os valores maiores do que 0, de uma forma geral são os que se encontram na área de chapada, sendo estes em menor quantidade.

4.1.2 Espacialização dos dados padronizados dos modelos digitais do ASTER GDEM e SRTM na região de chapada da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim

As diferenças padronizadas dos modelos digitais do sensor ASTER GDEM e SRTM apresentadas nos histogramas foram espacializadas para a avaliação visual das principais diferenças, representando em detalhe uma mesma área de chapada da BEARJ com grandes variações para facilitar a visualização.

Ao analisarmos a distribuição de frequência conjuntamente com os dados espacializados, podemos observar que a área apresentada na área de chapada, corresponde exatamente a área maior que 0 das diferenças altimétricas padronizadas, sendo está em menor ocorrência na área de estudo.

Na figura 10 podemos observar os dados padronizados de todos os modelos digitais do ASTER GDEM na região de chapada.

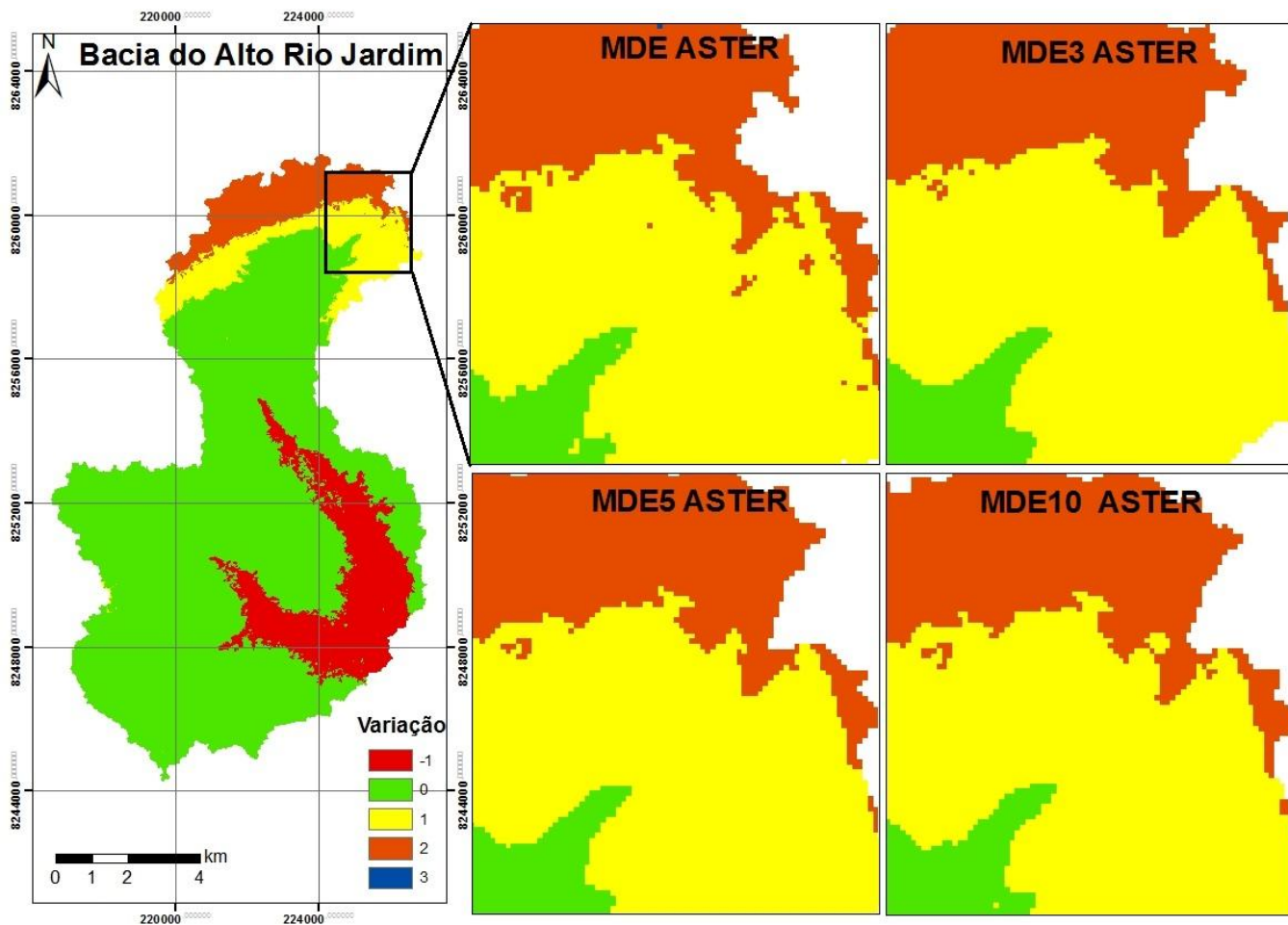


Figura 10 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na chapada geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor ASTER.

O mesmo molde de espacialização empregado nos modelos ASTER GDEM foi aplicado na mesma área de chapada da bacia para o modelo SRTM, que pode ser visualizado na figura 11.

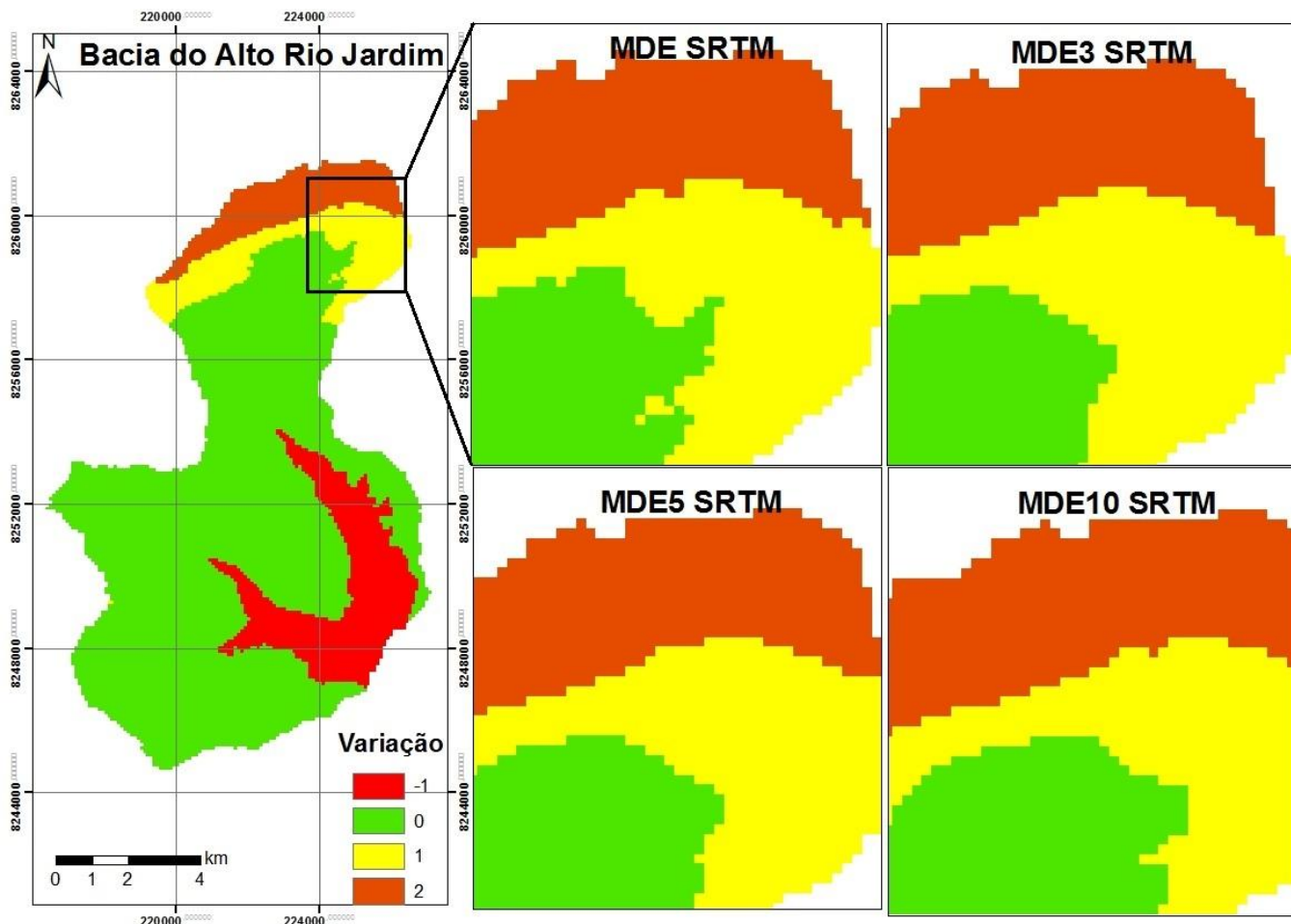


Figura 11 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na chapada geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor SRTM.

Nas duas imagens podemos observar mais uma vez as relações de interpolação pixel a pixel, de acordo com o limiar altimétrico empregado, a diferença no nível de detalhamento mostrado nas duas imagens se dá devido à escala de cada sensor, como já foi mencionado.

As diferenças ocorridas entre o limiar aplicado em ambos os satélites na mesma área de chapada da bacia, correspondem às diferenças altimétricas padronizadas maiores do que 0, onde foi possível observar que todos os modelos apresentaram variações entre si:

- MDE ASTER GDEM e SRTM - Ocorrência de maior variação altimétrica, gerando uma imagem mais heterogênea, sendo o que não recebeu tratamento.

- MDE3 ASTER GDEM e SRTM - Maior alteração em relação ao MDE ASTER GDEM e SRTM devido à variação de 3 metros ser facilmente encontrada na fitofisionomia típica do Cerrado, aumentando a quantidade de pixels a serem interpolados com a média dos vizinhos.
- MDE5 ASTER GDEM e SRTM - em questão de alterações do MDE ASTER GDEM e SRTM, ficou entre o MDE3 ASTER GDEM e SRTM e o MDE10 ASTER GDEM e SRTM.
- MDE10 ASTER GDEM e SRTM - Menor alteração em relação ao MDE ASTER GDEM e SRTM devido o limiar de variação altimétrica de 10 metros serem menos encontrado no Cerrado, diminuindo a quantidade de pixels interpolados com a média dos vizinhos.

4.1.3 Espacialização dos dados padronizados do ASTER GDEM e SRTM na região de depressão da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim

A espacialização dos dados altimétricos padronizados na área de chapada foi replicada para a área que corresponde à depressão na bacia e estão apresentadas pelos dados padronizados menores do que 0 nos histogramas. O objetivo de separar as duas áreas foi para avaliarmos a aplicação do tratamento realizado nos modelos dos satélites em diferentes compartimentos geomorfológicos.

Os dados padronizados do ASTER GDEM foram espacializados na área de depressão da bacia e estão apresentados na figura 12.

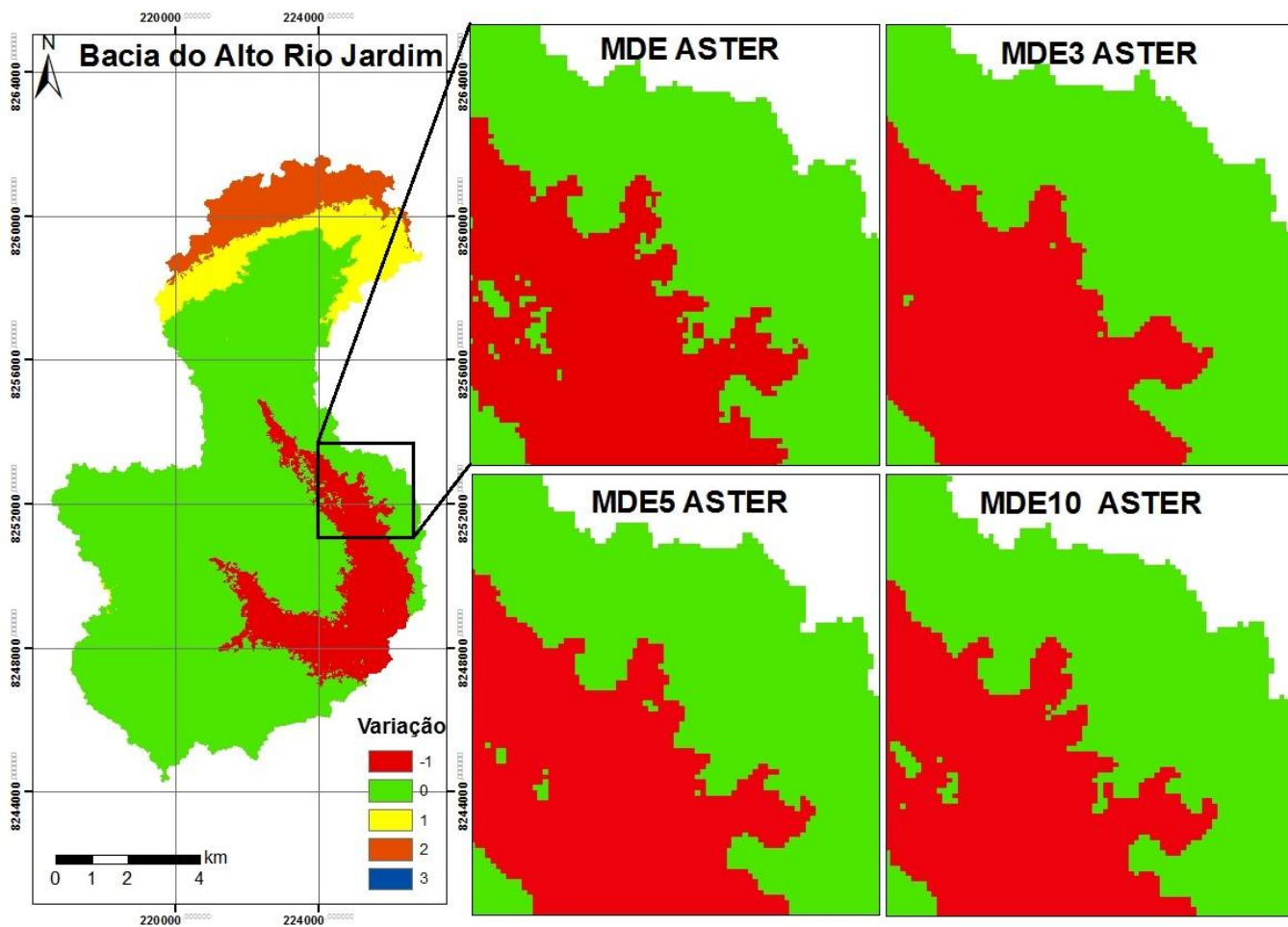


Figura 12 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na depressão geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor ASTER.

Como na chapada, a mesma área caracterizada como depressão apresentada nos modelos ASTER GDEM foi espacializada nos modelos SRTM (Figura 13).

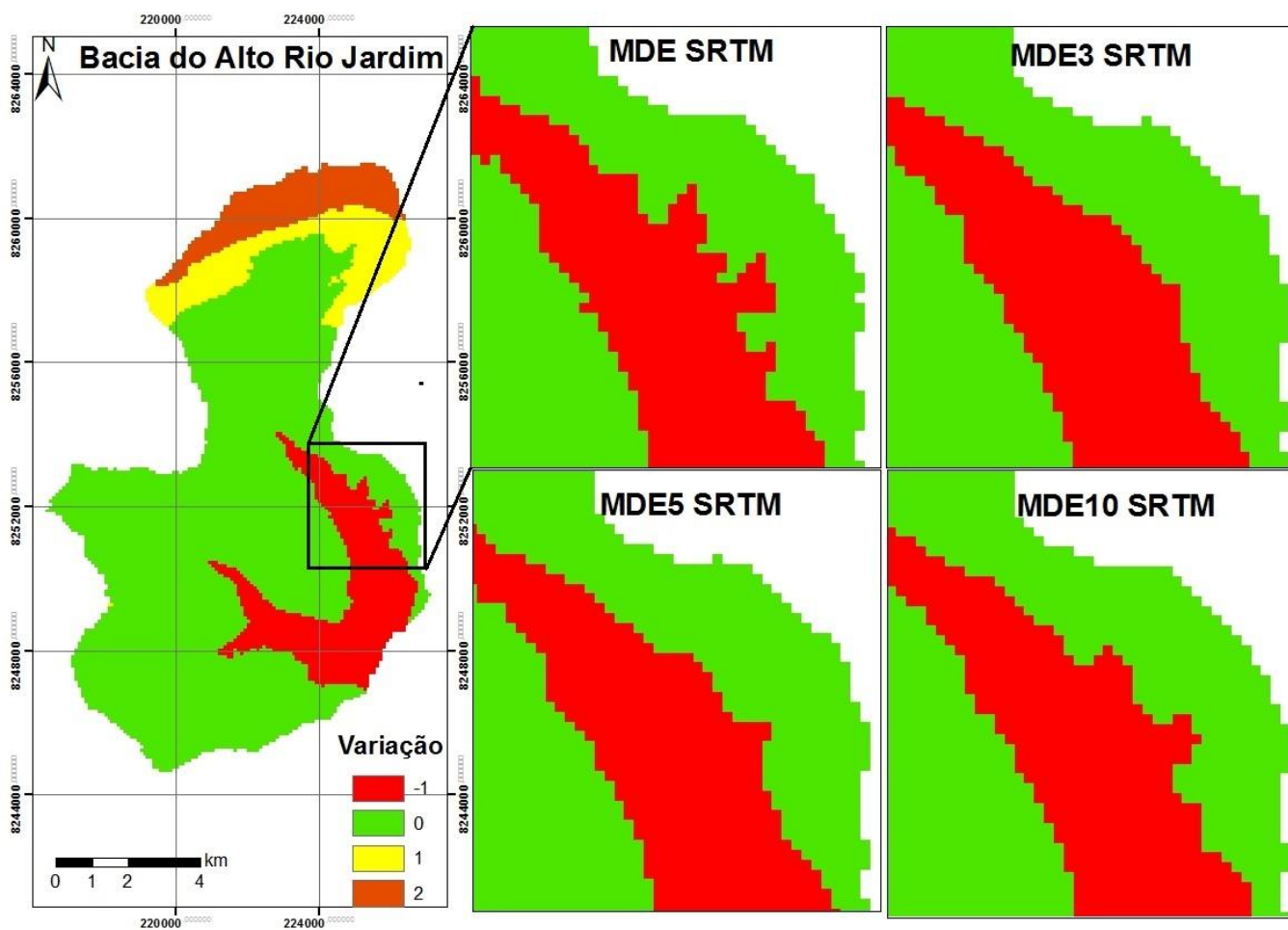


Figura 13 - Amostra da distribuição espacial das diferenças altimétricas padronizadas na depressão geradas pelos modelos digitais de elevação do sensor SRTM.

Foi possível observar que todos os modelos apresentaram variações de acordo com limiar empregado, porém os modelos de ambos os satélites seguiram um mesmo padrão de modificação do modelo original, apresentando grande relação entre o limiar empregado. As modificações ocorridas ficam mais visíveis nos modelos do satélite ASTER GDEM devido à escala.

4.1.4 Resultados do tratamento dos Modelos Digitais de Elevação ASTER GDEM e SRTM

A partir do Modelo Digital de Elevação original e dos tratados referente ao sensor ASTER GDEM, foi delimitada de forma automática a área de drenagem da BEARJ (Figura 14).

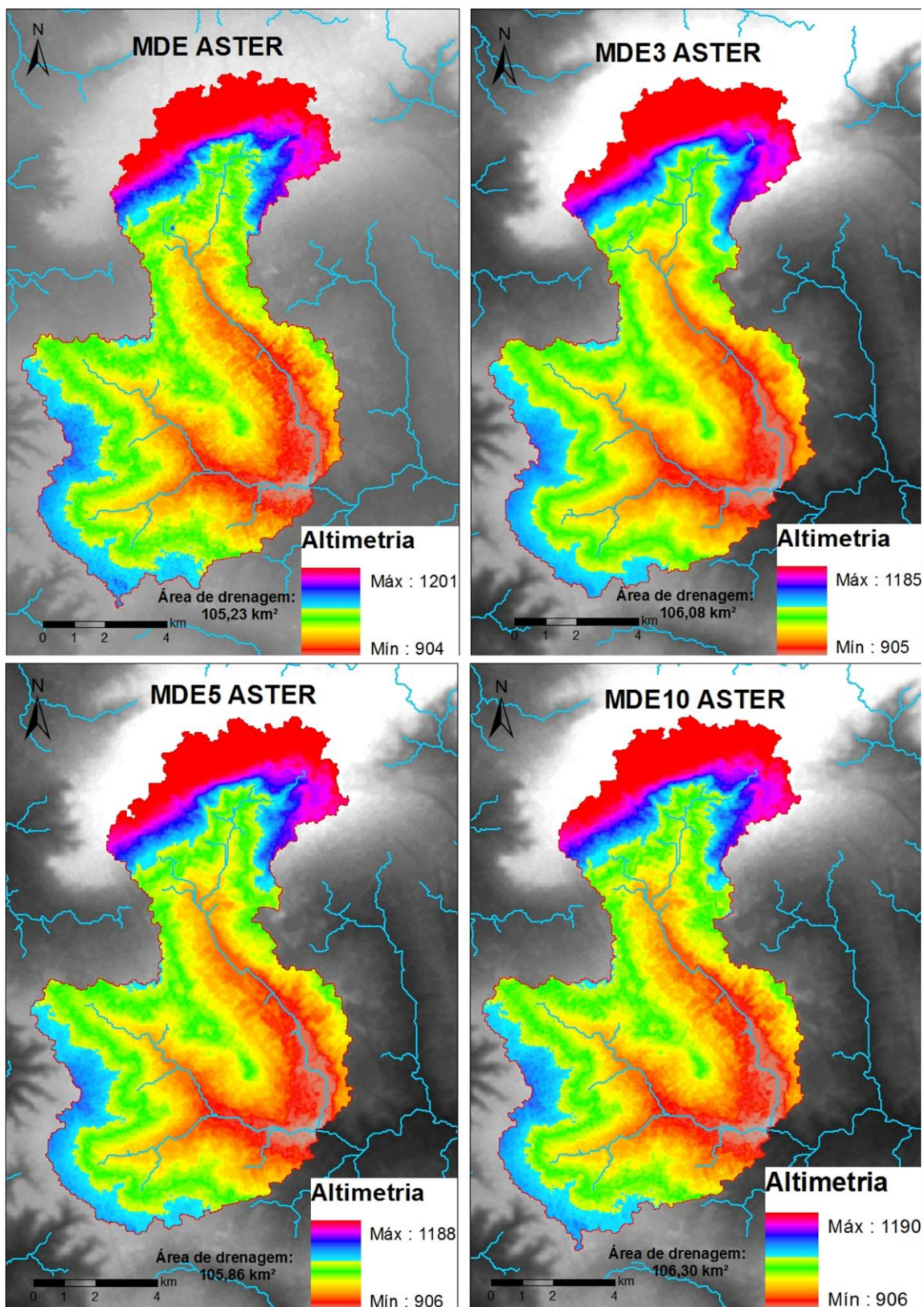


Figura 14 - Área de drenagem da BEARJ obtida por meio dos Modelos Digitais de Elevação original e tratados do sensor ASRER GDEM.

O mesmo processo utilizado para delimitação da área de drenagem da BEARJ com a imagem ASTER GDEM foi replicado na imagem SRTM e foram apresentados na figura 15.

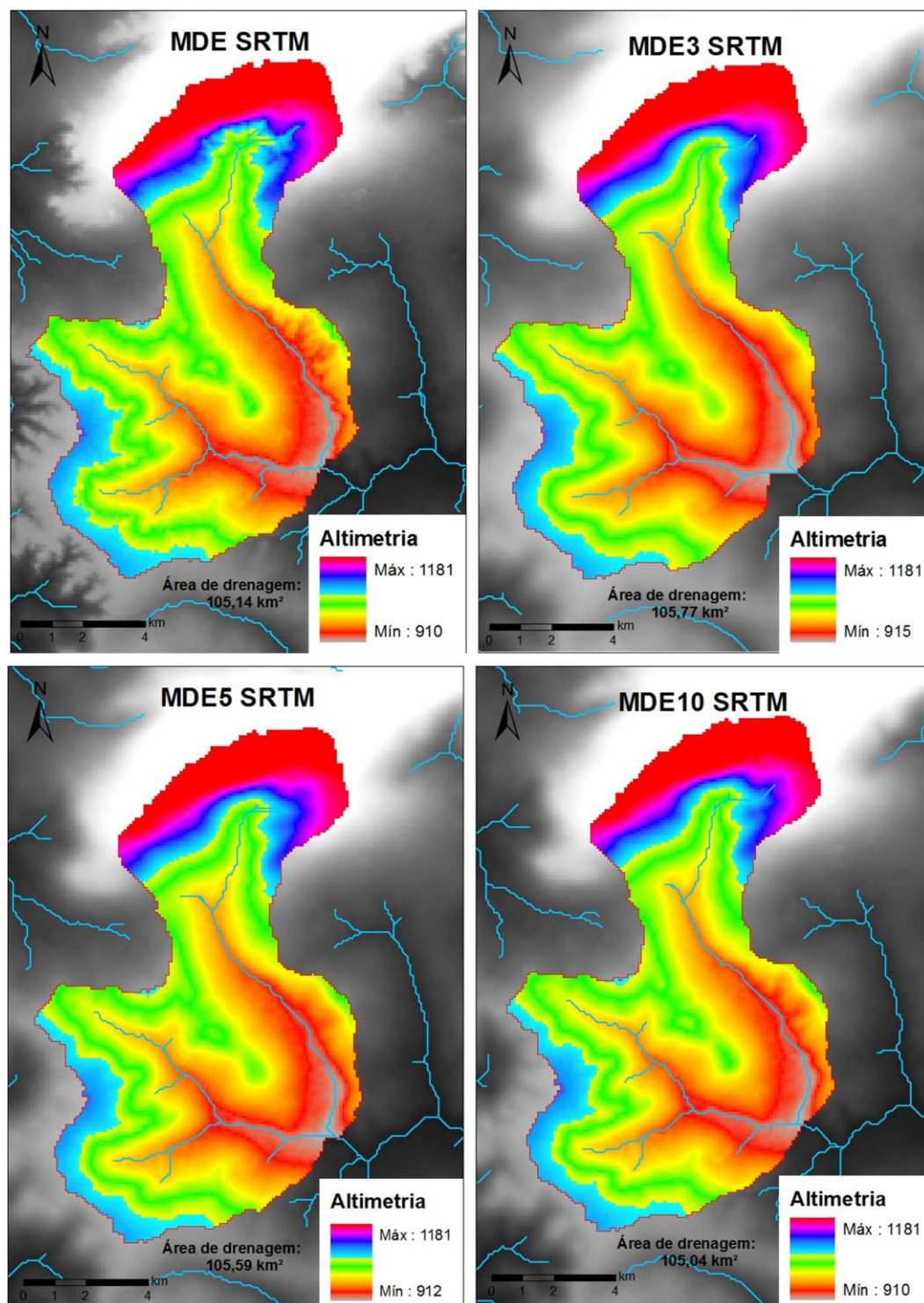


Figura 15 - Área de drenagem da BEARJ obtida por meio dos Modelos Digitais de Elevação original e tratados do sensor SRTM.

Ao analisarmos a delimitação da área da bacia e da drenagem geradas de ambos os sensores, podemos observar algumas diferenças que independem do tratamento empregado e que ocorrem devido à escala de cada imagem. Pode-se observar que os modelos digitais do ASTER GDEM (Figura 14) apresentam um nível de detalhamento maior, por trazer uma resolução espacial de 30 m enquanto que os modelos digitais SRTM (Figura 15) possuem resolução espacial de 90 m, apresentando um nível de detalhamento menor.

Podemos observar que de uma forma geral os modelos tratados apresentam menor variação altimétrica, formando compartimentos mais detalhados em relação ao modelo original. Isso pode ser atribuído ao que podemos observar na parte externa à bacia (escala de cinza), quanto à nitidez e clareza dos modelos interpolados e do original. Essa relação entre nitidez e clareza nos modelos originais e tratados, onde no ASTER GDEM os que receberam tratamento ficaram mais nítidos do que o original, já no SRTM foi ao contrário, podendo essa diferença ser atribuída à diferença de escala das imagens.

Observar-se que os modelos baseados na imagem SRTM a amplitude das diferenças altimétricas foram menores do que as observadas no ASTER. Outro ponto a ser observado, são as diferenças na área de drenagem e a própria formação da drenagem entre os modelos, que são variáveis diretas à altimetria. Quando foi aplicado o filtro de mediana e criado a máscara, os dados dos pixels que apresentaram valores superiores aos limiares empregados foram reinterpolados a partir da média dos vizinhos tendo o seu valor altimétrico alterado.

4.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DADOS DE DGPS

4.2.1. Estatística descritiva e Coeficiente de determinação

A tabela 4 mostra alguns dados estatísticos, como a média, desvio padrão, soma do quadrado do erro (SQE) e o grau de liberdade (gl) referente à comparação de cada modelo com os dados dos pontos de controle.

Tabela 4 - Média, desvio padrão (dp), soma do quadrado do erro (SQE), grau de liberdade da amostra (gl) da comparação entre os modelos e o DGPS.

Modelos	Média	dp	SQE	gl
MDE ASTER	5,286	4,254	2560,000	55
MDE3 ASTER	5,189	3,882	2294,939	54
MDE5 ASTER	5,088	3,842	2261,890	55
MDE10 ASTER	5,200	3,625	2236,912	55

Modelos	Média	dp	SQE	gl
MDE SRTM	6,327	4,092	3106,000	54
MDE3 SRTM	5,485	3,444	2295,354	54
MDE5 SRTM	5,388	3,401	2261,906	55
MDE10 SRTM	5,652	3,743	2559,622	55

Pode-se observar que todos os dados apresentam resultados muito próximos uns dos outros, tanto na comparação entre os sensores quanto no tipo de tratamento empregado (Tabela 4). De maneira geral esses dados apresentaram valores baixos, tanto na média (diferença entre os modelos e os pontos de controle) e no desvio padrão (dispersão da amostra), mostrando a qualidade dos dados orbitais.

Na figura 16 observa-se o resultado dispersão entre dos dados dos Modelos do sensor ASTER GDEM os pontos de controle obtidos por meio de DGPS.

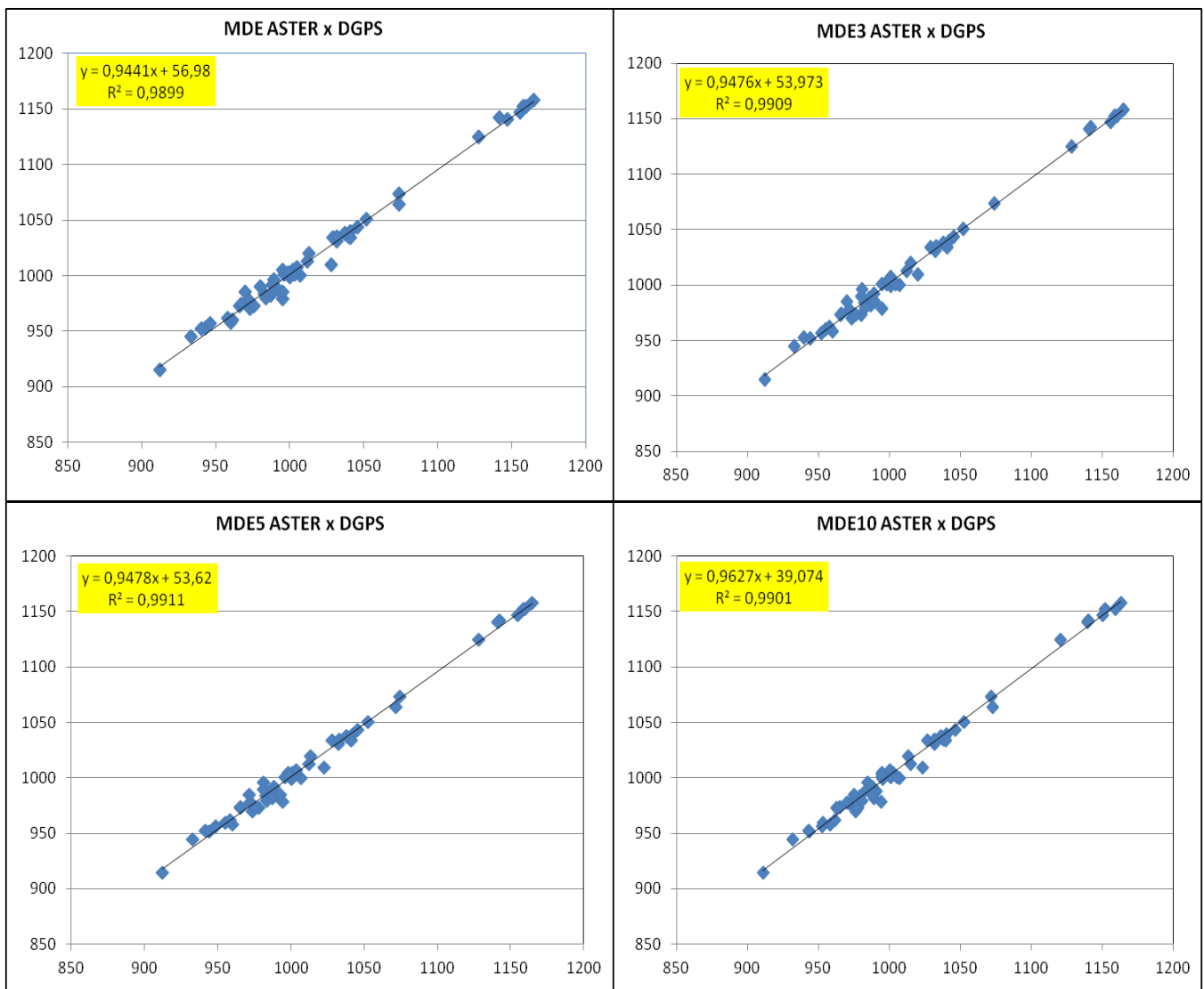


Figura 16 - Dispersão dos dados ASTER GDEM e DGPS.

Já na figura 17 pode-se observar o resultado dos gráficos de dispersão dos dados dos Modelos do sensor SRTM em relação aos do DGPS.

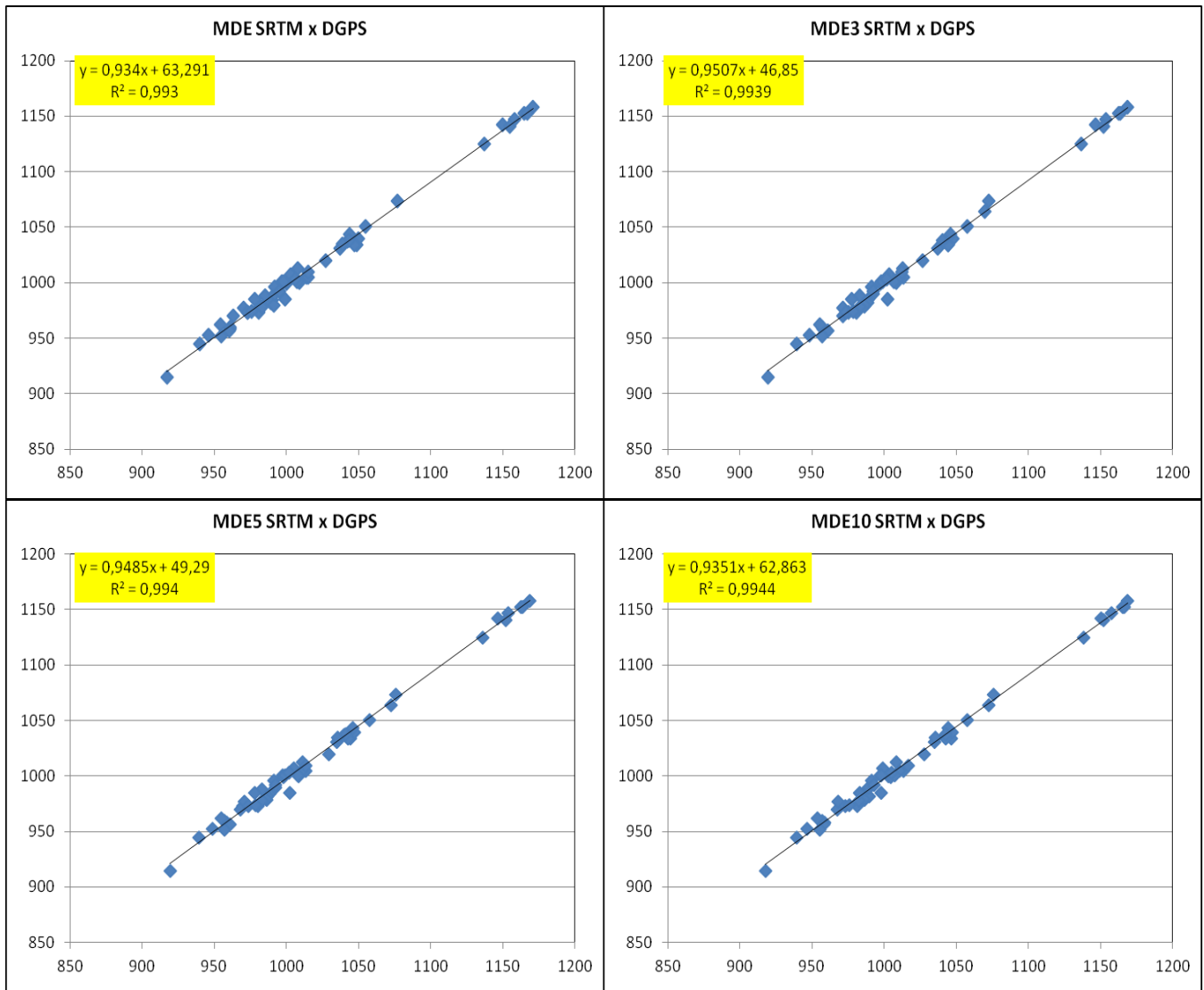


Figura 17 - Dispersão dos dados SRTM e DGPS.

Pode-se observar que em todos os gráficos dos dois sensores os valores de comparação se aproximam muito da linha 1:1, denotando uma alta correlação entre valores estimados (dados dos sensores) e os dados de campo (DGPS).

Apesar de alguns autores utilizarem esse tipo de avaliação (ELIASSON, 2000; SARWAR ; HELMUT, 2006; MONTEIRO *et al.*, 2007) é importante ressaltar que essa análise pode levar a uma conclusão distorcida em relação à qualidade da comparação, devido ao fato de a variação altimétrica ser muito maior do que o erro entre os valores estimados e os de controle. Dessa forma, ao representar a comparação direta das cotas estimadas e as de controle em um único gráfico,

mascara-se a relevância real da magnitude do erro, fazendo com que os pontos se mantenham próximos da linha 1:1(LIMA, 2010).

4.2.2. Erro Médio Quadrático (EMQ), tolerância vertical e Erro Padrão (EP)

Dessa forma, o enquadramento no PEC, por meio do EMQ, possibilitou compreender que os dados dos sensores estão com boa acurácia vertical, pois que de forma geral os dados originais apresentam um EMQ baixo, porém os tratados apresentaram resultados ainda melhores e estão sendo estes apresentados na figura 18 juntamente com o EMQ limite para a escala 1:50.000 classe A.

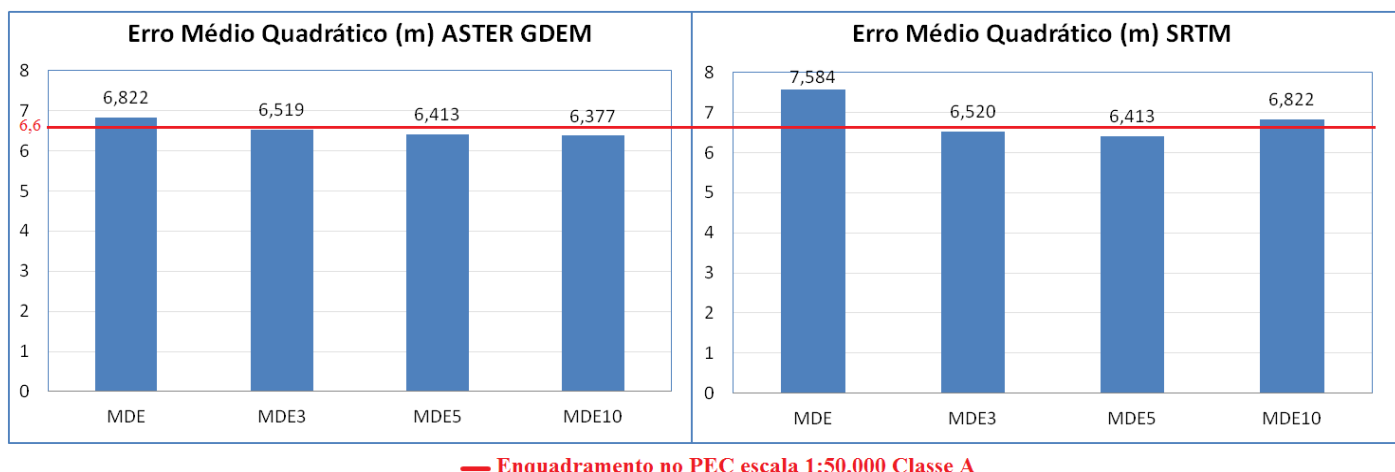
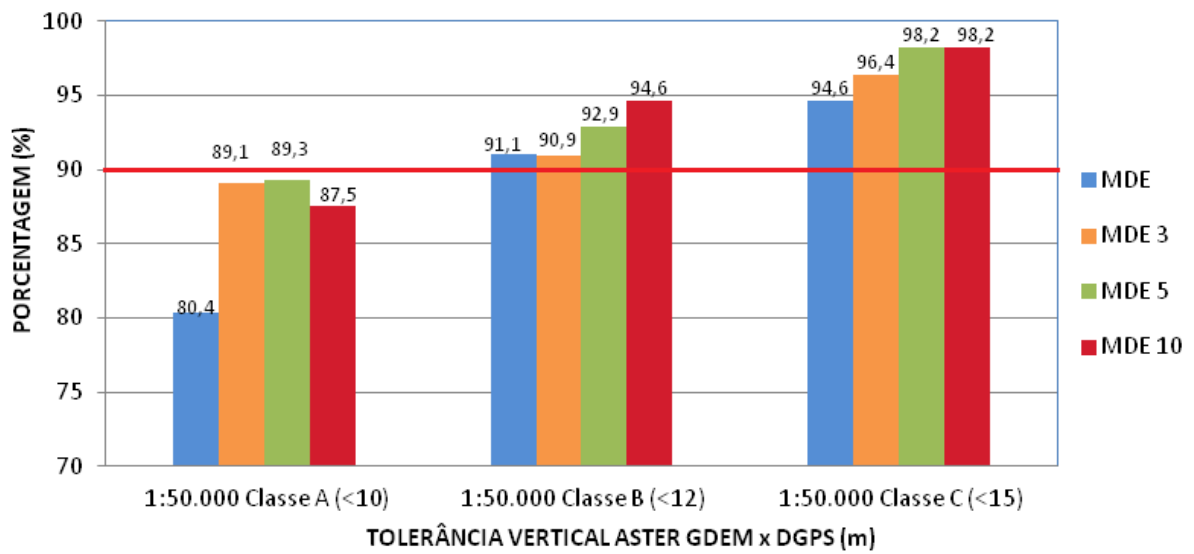


Figura 18 - Erro médio quadrático dos modelos em relação aos pontos de controle.

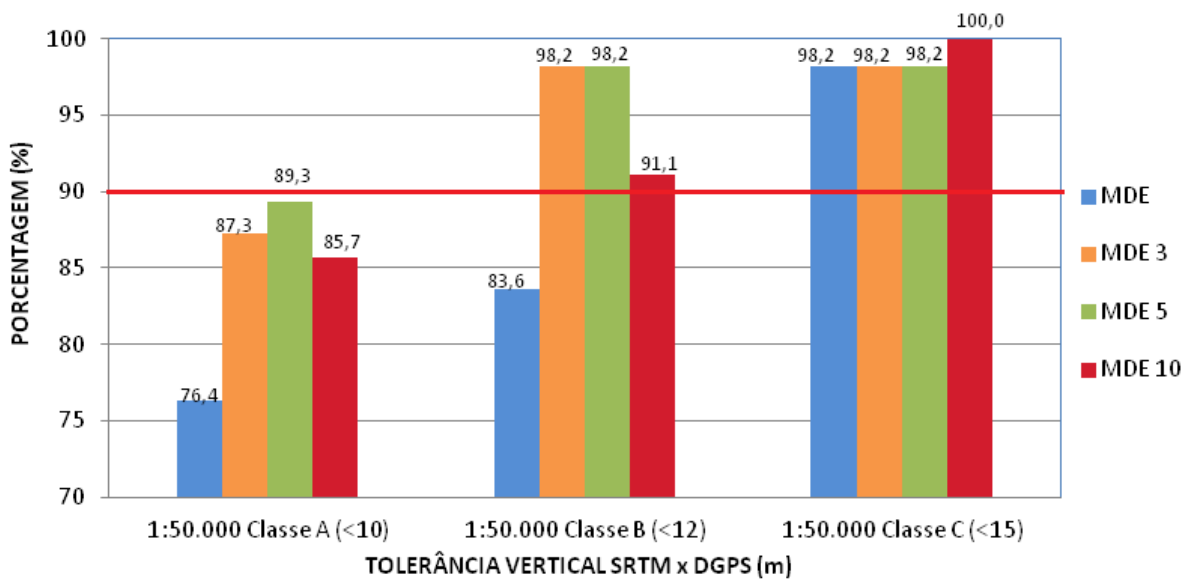
Considerando apenas o EMQ como padrão de enquadramento no PEC, na escala 1:50.000 classe A ($EMQ < 6,6$ m), observou-se que apenas os dados originais do sensor ASTER GDEM não se enquadraram. No caso do sensor SRTM, os dados originais MDE e aqueles que foram gerados por meio de variações altimétricas de 10 metros (MDE 10). Para o enquadramento na classe B, é necessário que se tenha uma $EMQ < 8$, assim sendo todos os modelos de ambos sensores se enquadraram nesta classe.

O PEC tem como principal regra de enquadramento juntamente com o EMQ a tolerância vertical, que está apresentada nas figuras 19 e 20.



— Porcentagem de enquadramento no PEC

Figura 19 - Tolerância vertical dos dados ASTER GDEM x DGPS.



— Porcentagem de enquadramento no PEC

Figura 20 - Tolerância vertical dos dados SRTM x DGPS.

Ao analisarmos o enquadramento de cada modelo no PEC de acordo com a tolerância vertical na escala 1:50.000, podemos observar que nenhum modelo foi enquadrado na classe A, ficando os modelos MDE3 e MDE5 ASTER GDEM, juntamente com o MDE5 SRTM muito próximos de alcançarem este enquadramento. Somente o modelo original do SRTM não se enquadrou na classe B, porém os

modelos que receberam tratamento com limiares de 3 e 5 m, apresentaram melhores resultados em relação aos mesmos limiares empregados no ASTER GDEM. Na classe C todos os modelos atingiram a porcentagem de corte menor que 15 m, sendo que o SRTM apresentou melhores resultados.

De uma forma geral os modelos do sensor ASTER GDEM apresentaram maior homogeneidade em relação aos do SRTM. Os modelos provenientes do SRTM apresentaram as maiores amplitudes de variação, porém os modelos que receberam tratamento tiveram melhor desempenho em relação aos do ASTER GDEM.

Nos dois sensores os modelos que tiveram maiores diferenças em relação aos pontos de controle foram os que não receberam tratamento algum, mostrando a importância do tratamento aplicado aos outros modelos.

Para finalizar, o enquadramento dos modelos no PEC, foi analisado conjuntamente o desempenho do EMQ e tolerância vertical para cada modelo e enquadrado de acordo com requisito mínimo de cada uma das variáveis. Na tabela 5, estão apresentados o erro padrão e o enquadramento no PEC referente à comparação de cada modelo com os pontos de controle.

Tabela 5 - Erro padrão (EP) e o enquadramento no PEC, referente à comparação de cada modelo com os dados do DGPS.

Modelos	EP	Escala 1:50.000	Escala 1:100.000
		Classe	Classe
MDE ASTER	0,57	B	A
MDE3 ASTER	0,52	B	A
MDE5 ASTER	0,51	B	A
MDE10 ASTER	0,48	B	A

Modelos	EP	Escala 1:50.000	Escala 1:100.000
		Classe	Classe
MDE SRTM	0,55	C	A
MDE3 SRTM	0,46	B	A
MDE5 SRTM	0,45	B	A
MDE10 SRTM	0,50	B	A

O erro padrão é um indicador de precisão da estimativa da média da amostra, quanto menor, melhor o resultado. Nos modelos ASTER GDEM o menor erro padrão foi encontrado no MDE 10 e nos modelos SRTM o melhor desempenho foi do MDE 5. Mesmo tendo essa diferença, todos os modelos apresentaram valores muito próximos e baixos, ressaltando a qualidade dos dados trabalhados.

Analisando todas as variáveis utilizadas na comparação entre os modelos e os dados do DGPS, fica claro o melhor desempenho dos dados que receberam tratamento em relação aos dados originais, ressaltando a importância de um pré-processamento dos dados originais.

Na comparação entre os modelos que receberam tratamento as diferenças entre eles em grande parte das variáveis de análise foi muito pequena ou não existiram na maioria dos modelos. Fato apresentado na proximidade dos dados descritivos é que quase todos os modelos foram enquadrados no mesmo PEC, mostrando mais uma vez a pouca variação entre eles. Porém, entre os 4 modelos ASTER GDEM, o que se aproximou mais do DGPS na análise integrada das variáveis utilizadas para validação dos dados foi determinado na seguinte sequência: MDE 10, MDE 5, MDE 3 e MDE. Os modelos do SRTM seguiram a seguinte sequência de desempenho em relação aos pontos de controle: MDE 5, MDE 3, MDE 10 e MDE.

Essa proximidade dos dados pode se dar pelo fato das características físicas da BEARJ, cujo relevo não apresenta alta declividade em grande parte da área de drenagem, e pelo fato dos pontos de controle não terem sido alocados com o intuito de salientar as diferenças do relevo na área de estudo.

Vale ressaltar que o tratamento empregado nesses sensores (ASTER GDEM e SRTM) para as peculiaridades da área de estudo (BEARJ) não apresentaram grandes diferenças entre si, mas o tratamento é imprescindível para que se obtenha um MDE que caracterize o mais próximo do real o terreno.

5. CONCLUSÃO

No processo de obtenção de um Modelo Digital de Elevação consistente para suporte a estudos hidrológicos, podemos dizer que os procedimentos utilizados visam à atenuação dos valores espúrios encontrados nos dados obtidos por sensores orbitais.

O estudo permitiu comparar o efeito de diferentes limiares de variação altimétrica para o pré-processamento do Modelo Digital de Elevação dos dois satélites em relação aos dados originais e a padronização mostrou-se importante ferramenta na espacialização e análise dos dados, permitindo melhor comparação entre os modelos.

Na validação dos MDE's, o estudo permitiu comparar os dados extraídos de cada modelo com os dados de campo levantados com GPS diferencial. O pré-processamento dos modelos originais se mostrou importante ferramenta para o melhor desempenho do MDE, à medida que atenuou os valores espúrios encontrados, suavizando o relevo.

Em relação aos limiares altimétricos empregados, os modelos de ambos os satélites que receberam tratamento apresentaram pouca variação entre si, mesmo sendo usados limiares diferentes.

Espera-se que os dados apresentados na presente monografia possam ser replicados para outras áreas de estudo com mesmas características e que possam servir de subsídio para diferentes estudos que necessitam de um Modelo Digital de Elevação e que visem elaboração de políticas públicas com foco na gestão dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F. **Techniques and strategies for DEM generation. In: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Digital photogrammetry an addendum to the manual of photogrammetry.** Ed. Cliff Greve, Chapter 6, 1996, 135 – 149p.

ADVANCED SPACEBORNE THERMAL AND REFLECTION RADIOMETER (ASTER). Disponível em: < <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>>. **Acesso em: 24 jun.2012.**

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

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; JÚNIOR, N. A. C. **Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 - Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3997-4004.

BRASIL. Decreto nº.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, DF, 22 jun. 1984.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 2005.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª Edição. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CODEPLAN. **Atlas do Distrito Federal. Brasília, DF: Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação. Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central**. 7. ed., 3 v. 1984.

ELIASSON, A. **Groundwater impact assessment and protection: predictive simulations for decision aid**. Tese de Doutorado. Stockholm: Royal Institute of Technology. 2000,134p.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; McKEAN, J. **Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model**. The Journal of Geology, Chicago, v. 110, 1993, 259-278p.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. [S. l.]: National Council for Air and Stream Improvement, 1998. 26p.

DOLABELLA, R. H. C. **Caracterização agroambiental e avaliação da demanda e da disponibilidade dos recursos hídricos para a agricultura irrigada na bacia hidrográfica do rio Jardim - DF**. Brasília: UnB, Dissertação Mestrado, 1996. 106p.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

ENGMAN, E. T. **Remote sensing applications to hydrology**. Future Impact. Hydrology Sciences Journal, v. 41, n. 4, 1996, 637-647p.

FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. **Geologia do Distrito Federal**. In: Distrito Federal (Brasil). Inventário hidrológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília: SEMATEC/IEMA/UnB; 1998, 1-186p.

HUTCHINSON, M. F. **A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits**. Journal of Hydrology.106, 1989, 211-232p.

IBGE. Mapa de biomas do Brasil, 2004. Disponível em: <www.mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>. Acesso em: 20 fev 2013.

INPE. SPRING: **Sistema de processamento de informações georeferenciadas. Tutorial de geoprocessamento**. Divisão de Geoprocessamento de Imagens. Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais. <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>. Atualização: 06 de fevereiro de 2004.

LIMA, J. E. F. W. ; SILVA, E. M. da. **Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2007.

LIMA, J. E. F. W. ; SILVA, E. M. da; KOIDE, S. **Implantação de unidade de monitoramento intensivo para apoio a estudos hidrológicos em área de Cerrado: a Bacia Experimental do Alto Rio Jardim - DF.** In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Rio de Janeiro - RJ. Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2008.

LIMA, J. E. F. W. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado.** Tese de Doutorado, Publicação PTARH. TD – 08/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010, 312p.

LIMA, J. E. F. W. ; SILVA, F. D. M.; **Geração do MDT corrigido da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim utilizando a base SICAD-DF e dados medidos com DGPS.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

MARÍN, L. E.; STEINICH, B.; ESCOLERO, O. A. (2005). **“Precision estimates for ellipsoidal height determinations for short baselines using DGPS system”.** Geofísica Internacional, 44(4), 391-394p.

MAUNE, D. F. **Introduction to digital elevation models (DEM).** In: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) Digital photogrammetry an addendum to the manual of photogrammetry. Ed. Cliff Greve, 1996, Chapter 6 131 – 141p.

MENKE, A. B.; GOMES, R. A. T.; GUIMERÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; OLIVEIRA, S. N. **Comparação entre modelos digitais do terreno gerados pela interpolação de dados topográficos com dados ASTER e SRTM.** In: XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Natal, RN. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2007.

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. 07, n. 01, 2005, 49-59p.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 25 mai. 2012.

MONTEIRO, J. P.; RIBEIRO, L.; REIS, E.; MARTINS, J.; MATOS SILVA, J. **Modelling stream-groundwater interactions in the Querença-Silves aquifer system.** Anais do XXXV IAH Congress - Groundwater and ecosystems, Lisboa: International Association of Hydrogeologists. 2007, 10p. Cd-Rom.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **A pyisically-based model for the topographic control on shallow landslide.** Water Resources Research, Washing- ton, v. 30, 1994, 1153 -1171p.

MOORE, I. D.; O LOUGHLIN, E. M.; BURCH, G. J. A. **Counter based topographic model for Hydrological and ecological applications.** Earth Surface and Processes and Landforms, Chichester, v. 13, 1988, 305-320p.

OKIMURA, T.; ISHIKAWA, R. **Prediction methods for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer.** Natural Disaster Science, Kyoto, v. 7, 1985, 41-51p.

O LOUGHLIN, E. M. **Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis.** Water Resources Research, Washington, v. 22, 1986, 794-804p.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. **The extraction of drainage networks from digital elevation data.** Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1984, 28, 323-344p.

PINTO, A. O. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMERÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; NETO, M. D. A. **Tratamento dos dados da missão *shuttle radar topography mission* e comparação com modelo digital de terreno gerado por interpolação de cartas topográficas.** Espaço & Geografia, Vol.7, No 1 (2004), 77:97, ISSN: 1516-9375

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

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; CHAGAS, C. S.; MARTINS, E. S.; AANDAHUR, J. P.; GODOY, M. J. S. E.; ASSAD, M. L. C. L. **Levantamento semi-detalhado dos solos da bacia do rio Jardim-DF, escala 1:50.000.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 18, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000. 63p.

SARWAR, A.; HELMUT, E. **Development of a conjunctive use model to evaluate alternative management options for surface and groundwater resources.** Hydrogeology Journal; 2006, 14, 1676-1687p.

SILVA, F. D. M.; LIMA, J. E. F. W.; COUTO JUNIOR, A. F.; MARTÍNS, P. R.; CHAVES, T. A. **Avaliação do uso de diferentes limiares de variação altimétrica para o pré-processamento do Modelo Digital de Elevação de uma bacia experimental do Cerrado.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, p. 5584-5590.

SILVA, J. M. C.; BATES, J. M. **Biogeographic Patterns and Conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot.** Bioscience, v. 52, 2002, 225-234p.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CORREIA, J. R.. **Aptidão Agrícola das terras da bacia do rio Jardim, DF.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento/ Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X; n. 27, 2002. 38p.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul.** INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/SP, 2004, 72p.

WOLF, P.R. **Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing.** Second Edition. New York, McGraw-Hill Book Company, 1983, 628p.