



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
IG/ IB/ IQ / FACE-ECO/ CDS
CURSO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

HUGO LUIZ REGO

**Avaliação de modelos digitais de elevação para a delimitação automática de
bacias hidrográficas**

BRASÍLIA - DF

Dezembro / 2023

HUGO LUIZ REGO

**Avaliação de modelos digitais de elevação para a delimitação automática de
bacias hidrográficas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Brasília, como requisito parcial
para obtenção de grau de bacharel em Ciências
Ambientais.

Orientador: Uidemar Morais Barral

BRASÍLIA - DF

Dezembro / 2023

HUGO LUIZ REGO

**Avaliação de modelos digitais de elevação para a delimitação automática de
bacias hidrográficas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Aprovado em 15 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Uidemar Moraes Barral (Orientador)
Instituto de Geociências - IG
Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Ricardo Bomfim Machado
Instituto de Biologia - IB
Universidade de Brasília (UnB)

“Pensa em ti como alguém que morreu. Você já viveu a sua vida até aqui. Agora, agarre os dias que te sobraram, e viva-os de maneira adequada. Aquele que não transmite luz cria sua própria escuridão.”

- Marco Aurélio (121 d.C - 180 d.C)

Agradecimentos

De minha mãe, Luzia, aprendi desde cedo a paixão pela literatura e pela arte. Levo comigo todos os dias seus ensinamentos sobre o perdão, generosidade e benevolência. Seu jeito compreensivo e amoroso se tornou um pilar emocional, não só para mim, mas para toda família. Espero um dia poder retribuir para as pessoas à minha volta de forma tão grandiosa quanto ela.

O meu pai, Rubens, me deu o exemplo de dedicação, inteligência, força e caráter. Me mostrou o caminho do estudo e esforço como forma de mudança de vida e foi a pessoa que mais me incentivou a cursar uma universidade federal, que sem dúvidas foi minha melhor escolha.

Meu irmão, Matheus, é um exemplo de autenticidade. Sempre me ensinou a pensar fora da curva e entender que tudo na vida possui múltiplas facetas.

Por esses ensinamentos, sou eternamente grato.

Agradeço, do fundo do meu coração, à Janaina Soares, melhor amiga, namorada e maior admiração. Quando estou com ela me sinto seguro, feliz e em paz.

Agradeço também aos meus amigos, Alexandre Nascimento, Caion Fonseca, Fellipe Sattin, Eduardo Jaruga e Pedro Vinícius, que me trouxeram alegria e leveza nos momentos em que mais precisei. Agradeço também em especial, aos colegas de curso, Stefano Mosna, que me apresentou as ciências ambientais e me passou o caminho das pedras desde o meu primeiro semestre na universidade, e Davi Camargo, que me ajudou em conceitos fundamentais para desenvolver esse trabalho.

Ao Professor Uidemar Barral, agradeço pelo conhecimento passado, pela ótima relação que possui com os alunos, pelo auxílio fundamental na reta final da minha graduação e por ser, para mim, uma referência de profissional no meio acadêmico.

Ao Professor Pedro Zuchi, agradeço por ser um dos fundadores do curso de Ciências Ambientais na UnB e por tornar a matéria Trabalho Interdisciplinar Integrado 2 (TII2) o que é hoje. A matéria TII2, lecionada por Pedro Zuchi e Uidemar Barral é atualmente uma etapa de mudança, onde ocorre o crescimento exponencial dos conhecimentos e da experiência do aluno, essencial na graduação em Ciências Ambientais na Universidade de Brasília (UnB).

Ao curso Ciências Ambientais e colegas de graduação, agradeço por moldar quem sou hoje. Nunca me senti tão pertencente a um local e acredito na força e importância do curso. As ciências ambientais são a linha de frente do bem-estar, desenvolvimento social e futuro da humanidade.

À Universidade de Brasília (UnB) tenho a agradecer por ter sido meu maior sonho e por me permitir sonhar muito além. Tenho certeza que após passar por aqui minha vida nunca mais será a mesma.

Resumo

A bacia hidrográfica, um ente sistêmico de conjunto de vertentes e rede de drenagem, é a unidade territorial para a aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). A PNRH influencia diretamente a vida, o meio ambiente, o bem-estar, o desenvolvimento social e econômico da sociedade. Dessa forma, se faz necessário a padronização e automatização dos limites das bacias hidrográficas para a aplicação efetiva da política.

Nos dias atuação, com os avanços da tecnologia e disseminação de dados digitais e *softwares* de Sistema de Informações Geográficas (SIG), a utilização de modelos digitais de elevação (MDE) para delimitação automática de bacias hidrográficas vem substituindo os métodos de delimitação manual do passado.

Entendendo a importância da delimitação correta de uma bacia hidrográfica e a ampla disponibilidade de dados digitais, o intuito deste trabalho foi de avaliar os MDEs NASADEM, SRTM3, Alos AW3D30 para delimitação automática de bacias hidrográficas. Além disso, foi objetivo específico do trabalho investigar a base de dados, precisão altimétrica e dos limites de uma delimitação automática de bacias hidrográficas do MDE obtido pelo método utilizando a base de dados do GPS Visualizer e pontos de coordenada do coletados do Google Earth.

O trabalho obteve resultados que demonstraram que os dados de altitude dos MDEs são semelhantes, com pequenas diferenças dos valores em metros. No estudo, a resolução espacial dos MDEs e sua relação com a rede drenagem foi mais determinante para a delimitação automática que diferenças pontuais de altitude. O MDE Interpolado GPS Visualizer/Google demonstrou que sua base de dados são do MDE SRTM3. Porém, mesmo com essa proximidade de dados de altitude, o MDE não obteve resultados satisfatórios na delimitação automática de bacia hidrográfica. Não sendo recomendado sua utilização em estudos hidrológicos.

Abstract

The river basin, a systemic entity made up of a set of slopes and a drainage network, is the territorial unit for implementing the Brazil National Water Resources Policy (PNRH). The PNRH directly influences life, the environment, well-being and the social and economic development of society. It is therefore necessary to standardize and automate the boundaries of river basins in order to apply the policy effectively.

Nowadays, with advances in technology and the dissemination of digital data and Geographic Information System (GIS) softwares, the use of digital elevation models (DEM) for the automatic delineation of river basins has been replacing the manual delineation methods of the past.

Given the importance of correctly delineating a watershed and the wide availability of digital data, the aim of this study was to evaluate the NASADEM, SRTM3 and Alos AW3D30 DEMs for automatic watershed delineation. In addition, the specific objective of the work was to investigate the database, altimetric accuracy and boundaries of an automatic delimitation of river basins from the DEM obtained by GPS Visualizer database and coordinate points from Google Earth Pro.

The work obtained results that showed that the altitude data from the DEMs are similar, with small differences in the values in meters. In the study, the spatial resolution of the DEMs and their relationship with the drainage network was more decisive for automatic delimitation than specific differences in altitude. The GPS Visualizer/Google Interpolated DEM showed that its database is from the SRTM3 DEM. However, even with this proximity of altitude data, the DEM did not obtain satisfactory results in automatic watershed delimitation. Therefore, it is not recommended for use in hydrological studies.

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema básico do funcionamento de um sistema sensor usado em sensoriamento remoto.....	17
Figura 2 - Demonstração do princípio de funcionamento da tecnologia Radar. A onda transmitida pelo radar, reflete no objeto, e é detectado seu retorno. 18	18
Figura 3 - O interferômetro da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), mostrando o comprimento dos caminhos até os dois espalhadores (a) e (b). Os espalhadores podem ser qualquer objeto na cena, como , folhas, galhos, solo, etc.....	19
Figura 4 - Exemplo de imagens com diferentes resoluções espaciais de 0,5 m a 80 m (largura do pixel).....	20
Figura 5 - Observação das geometrias do PRISM: A, modo de observação triplo (OB1), e B, modo de observação estéreo (OB2).....	22
Figura 6 - Mapeamento dos MDEs utilizados na base de dados de altitude do GPS Visualizer. Fonte -.....	23
Figura 7 - Mapa da localização da Bacia do Rio São Bartolomeu com os municípios pertencentes ao estado de Goiás (GO) e sua respectiva área no Distrito Federal (DF)	24
Figura 8 - Mapa da hidrografia da Bacia do Rio São Bartolomeu e suas principais bacias vizinhas.....	25
Figura 9 - Mapeamento da localização e municípios da Bacia do Rio São Bartolomeu.....	28
Figura 10 - Representação física do mapa de direção de fluxo - a) Com setas direcionais; b) Como uma rede de drenagem.....	28
Figura 11 - Correlação dos dados de altitude dos modelos digitais de elevação NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3.....	34
Figura 12 - Correlação dos dados de altitude dos modelos digitais de elevação inteoporlado Google Visualizer com os modelos digitais de elevação NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3.....	34

- Figura 13** - Distribuição das frequências das diferenças de altitude entre o MDE Interpolado GPS/Visualizer e os MDE rasters (NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3)..... 35
- Figura 14** - Correlação dos dados de altitude das referências de nível com os modelos digitais de elevação NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3 e Interpolado GPS Visualizer/Google..... 36
- Figura 15** - Distribuição das frequências das diferenças de altitude entre os MDEs NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3 e Interpolado GPS/Visualizer com as 231 referências de nível..... 38
- Figura 17** - Pontos de exutório em vermelho definidos com base na rede de drenagem de cada MDE para a delimitação da bacia total do rio São Bartolomeu..... 41
- Figura 18** - Bacias delimitadas automaticamente pelos MDEs NASADEM e Alos AW3D30. Em verde está a área da Ottobacia do rio São Bartolomeu e em vermelho a diferença na delimitação automática de cada MDE..... 42
- Figura 19** - Pontos de exutório em vermelho definidos com base na rede de drenagem de do MDE Interpolado GPS Visualizer/Google e NASADEM para a delimitação da bacia grande, média e pequena..... 43
- Figura 20** - Em cima, bacia média e pequena delimitadas automaticamente pelo MDE Interpolado GPS Visualizer/Google e em baixo as Ottobacias codificadas para as duas áreas..... 44

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estatística básica (Média, Desvio Padrão, Valor Máximo e Mínimo e Erro Médio Quadrático) das diferenças de altitude entre o MDE Interpolado GPS/Visualizer e os MDE rasters..... 36

Tabela 2 - Análises estatísticas (Média, Desvio Padrão, Valor Máximo e Mínimo e Erro Média Quadrático) das diferenças de altitude entre os MDEs rasters e as 231 referências de nível..... 38

Tabela 3 - Coordenadas UTM dos pontos de exutório para a delimitação das bacias grandes, médias e pequenas utilizando os MDEs NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3..... 41

Tabela 4 - Coordenadas UTM dos pontos de exutório para a delimitação das bacias médias e pequenas utilizando o MDE Interpolado GPS Visualizer/Google.. 43

Tabela 5 - Porcentagem de sobreposição dos limites das bacias geradas a um buffer de 500m, 250m, 100m nos limites das Ottobacias codificadas..... 45

Sumário

1. Introdução.....	12
2. Revisão de Literatura.....	13
3. Referencial Teórico.....	15
4. Metodologia.....	23
4.1. Área de Estudo.....	23
4.2. Geomorfologia.....	25
4.3. Clima.....	26
4.4. Análise de Dados.....	26
4.4.1. Aquisição dos Modelos Digitais de Elevação NASADEM e ALOS AW3D30.....	26
4.4.2. Geração do Modelo Digital de Elevação GPS Visualizer/Google Earth.....	27
4.4.3. Delimitação automática de Bacias Hidrográficas.....	27
4.4.4. Análise dos Modelos Digitais de Elevação.....	29
4.4.5. Análise da delimitação automática de Bacias Hidrográficas.....	30
5. Resultados e Discussão.....	32
5.1. Análise dos Modelos Digitais de Elevação.....	32
5.2. Análise da delimitação automática de Bacias Hidrográficas.....	39
6. Conclusão.....	46
Referência Bibliográfica.....	47

1. Introdução

Por ser um recurso de disponibilidade limitada, essencial à vida, desenvolvimento e bem-estar social a água e, conseqüentemente, as bacias hidrográficas devem ser observadas no desenvolvimento regional, qualitativa e quantitativamente, pautando-se pela garantia do equilíbrio entre ações voltadas ao crescimento econômico e conservação do meio ambiente (Medeiros, Ferreira, Ferreira Jr., 2009).

A bacia hidrográfica é definida pela Lei Federal n o 9.433/97 como unidade territorial para aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). São instrumentos da PNRH: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios; o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Assim, a padronização e automatização dos limites das bacias hidrográficas são fundamentais para a aplicação efetiva dessa política nacional (Alves Sobrinho et al., 2010; Brasil, 2023).

Atualmente, a grande facilidade e disseminação de dados digitais e *softwares* de Sistema de Informações Geográficas (SIG), técnicas de delimitação automática de bacias e sub-bacias hidrográficas substituíram as maneiras de delimitação manual utilizadas no passado. Modelos Digitais de Elevação (MDE), Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais de Terreno (MDT), obtidos por diferentes equipamentos e técnicas, são elementos fundamentais para essa delimitação automática (Medeiros, Ferreira, Ferreira Jr., 2009).

O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes MDEs, sendo o NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3 para a delimitação automática de bacias hidrográficas. O trabalho foi realizado na região da bacia do rio São Bartolomeu, em Goiás e Distrito Federal, no Brasil.

Além da avaliação de MDEs raster, foi objetivo específico do trabalho investigar a base de dados, precisão altimétrica e dos limites de uma delimitação automática de bacias hidrográficas do MDE obtido pelo método utilizando a base de dados do GPS Visualizer e pontos de coordenada do coletados do Google Earth.

2. Revisão de Literatura

São reconhecidas como unidade espacial na Geografia Física, desde o fim dos anos 60 do século XX, as bacias hidrográficas (Botelho, 2004), porém apenas nos anos 90 que essa unidade básica passou a ser utilizada na pesquisa e gestão territorial. Vários profissionais que trabalham com gestão de recursos hídricos necessitam do mapeamento de bacias hidrográficas (Newson, 1992). A delimitação de uma bacia hidrográfica permite entender e avaliar os diversos processos, componentes e interações que ocorrem em sua área (Botelho, 2004).

No passado, a delimitação de bacias hidrográficas era feita a partir de cartas topográficas analógicas, traçando manualmente, em torno da drenagem considerada e pontos mais elevados da região, a linha divisora de águas. Atualmente, com a evolução da tecnologia e dos sistemas de informações geográficas (SIG) os profissionais buscaram outras formas, mais eficientes, de realizar esse processo, uma delas é com uso de modelos digitais de elevação (MDE) (Medeiros, Ferreira, Ferreira Jr., 2009).

Diversos estudos analisaram diferentes tipos MDEs, onde foram abordados temas como: acurácia da extensão dos dados de elevação; performance dos MDEs em gerar derivações básicas da hidrologia de um local, por exemplo os limites de uma bacia hidrográfica e rede de fluxo de drenagem (Rusli, Majid, Din, 2014); métodos de interpolação de pontos (Medeiros, Ferreira, Ferreira Jr., 2009).

Rusli, Majid e Din (2014) correlacionaram pontos de coordenada dos modelos digitais de elevação ASTER30, ASTER10 e SRTM90 com um MDE produzido pela interpolação de pontos com dados de elevação no software Google Earth em uma bacia hidrográfica na Malásia. A bacia hidrográfica foi dividida em 36 áreas representativas de três tipos de terreno, sendo, plano, com colinas e montanhoso. Nas áreas planas e com colinas, o Google Earth teve uma forte correlação com os pontos obtidos pelo SRTM90 ($r = 0,89$ e $0,94$, respectivamente). Para os MDEs ASTER30 e ASTER10, a correlação foi fraca nos dois tipos de área. Nas áreas montanhosas houve uma correlação forte entre o Google Earth e ASTER 10 e ASTER 30 ($r = 0,96$, para os dois MDEs) e observou-se uma redução na correlação para o MDE SRTM90 ($r = 0,93$). Para área da bacia hidrográfica, os autores observaram uma diferença de 9,6%, 10,6% e 7,6% para Google Earth, ASTER e SRTM, com isso concluíram que o MDE derivado do Google Earth pode ser

utilizado, assim como os MDEs de outras fontes. O estudo não abordou a forma de obtenção dos dados de altitude do Google Earth.

Os métodos de interpolação de pontos altimétricos são utilizados na geração de MDE. Medeiros, Ferreira, Ferreira Júnior, (2009) usaram MDEs gerados a partir de bases cartográficas por meio dos métodos de interpolação *TopoGrid*, *IDW*, *TIN/GRID* e *TIN/GRID₅*. Porém, os MDEs gerados foram classificados como padrão classe B (escala 1:100.000) segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) - Altimétrico, por meio da comparação dos erros às Ottobacias. O método de interpolação *TopoGrid* obteve o melhor desempenho entre os métodos de interpolação utilizados. Os limites gerados a partir do MDE SRTM, em regiões com baixa declividade resultaram em menor simetria entre os limites gerados e os limites das ottobacias de referência. Nas áreas de relevo plano, a área coincidiu 80% dos limites das bacias referência, na classe de relevo montanhoso, atingiu 92% dos limites.

3. Referencial Teórico

As bacias hidrográficas são um ente sistêmico de áreas compostas por um conjunto de vertentes e uma rede de drenagem formada por cursos d'água, que se juntam e resultam em um único leito no seu exutório (Tucci, 1997). Todos os tipos de áreas, sejam elas, áreas agrícolas, industriais ou urbanas, fazem parte de uma bacia hidrográfica (Porto, Porto, 2008).

Essa unidade territorial interage com outra de ordem hierárquica superior, formando, em relação à bacia maior, uma sub-bacia. Os conceitos de bacia e sub-bacias se relacionam a ordens hierárquicas dentro de uma determinada malha hídrica. É bastante comum o termo “micro-bacia”, porém, é uma denominação empírica, imprópria e subjetiva. Com isso, o termo sub-bacia hidrográfica deve ser utilizado (Silva et. al., 2012).

A escala de uma bacia depende do problema a ser solucionado. Por exemplo, a bacia do Rio Amazonas pode ser delimitada em sub-bacias desde suas cabeceiras nas cordilheiras andinas até o Oceano Atlântico do outro lado do país, como uma única grande bacia hidrográfica. A definição do tamanho da delimitação das suas sub-bacias depende do objeto de estudo/trabalho. O tamanho ideal de uma bacia hidrográfica é aquele que incorpora toda a problemática de interesse (Porto, Porto, 2008).

Atualmente no Brasil, existem 4 grandes sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas. Esses sistemas foram produzidos por diferentes órgãos, sendo eles: DNAE/Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da SRH/Ottobacias, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (Galvão, Meneses, 2005).

Além dessa delimitação de bacias hidrográficas feita por diversos órgãos relacionados a recursos hídricos a nível nacional, para trabalhos específicos é comum a delimitação automática de bacias hidrográficas. Uma das formas de delimitação automática de bacias hidrográficas é feita por modelos tridimensionais, como modelos digitais de elevação (MDE), modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais de terreno (MDT) (Medeiros, Ferreira e Ferreira Jr., 2009).

Os MDEs são imagens raster ou uma matriz onde cada pixel tem como atributo um valor numérico que representa a elevação/altitude de um terreno em relação a um referencial (Burrough, McDonnell, Lloyd, 1998; Buarque et al., 2009).

Os dados da topografia de um terreno, na maioria das vezes, são manipulados sobre essa forma de informação digital.

Os MDEs são fontes para o conhecimento do relevo da superfície de um terreno. A partir deles podem ser obtidas informações de declividade, exposição solar, drenagem do terreno. Sua utilização ainda permite o planejamento de uso de determinada área como a identificação de áreas propícias para plantação, conservação de solo, além de serem de fundamental importância em modelagem hidrológica e delimitação de bacias hidrográficas (Landau, Guimarães, 2011). Sendo dados de grande relevância para o campo do sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto (SR) é a ciência que busca obter e transmitir informações de um objeto, fenômeno ou área, com base em análise de dados obtidos por um sensor que não está em contato com o objeto de estudo (Figura 1) (Lillesand, Kiefer, 1994). A grande vantagem do SR é a rapidez gerada pela falta de necessidade de ir a campo para coleta de dados, como a elevação de um terreno presente nos Modelos Digitais de Elevação.

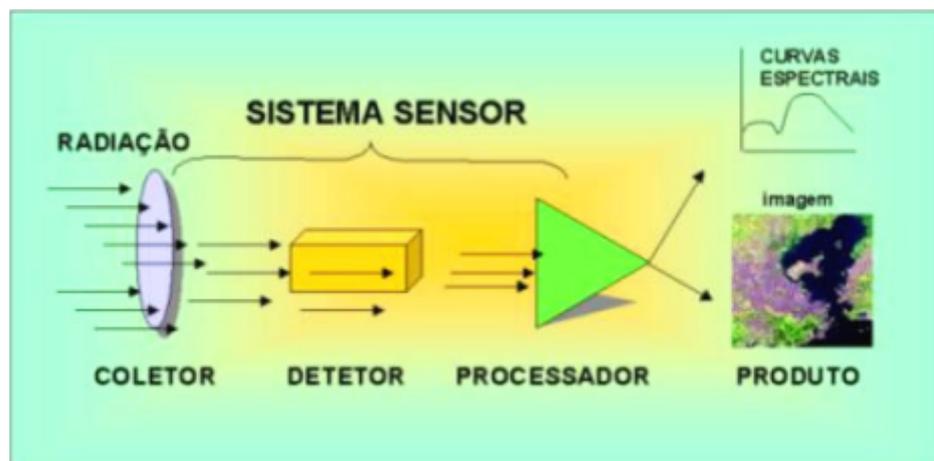


Figura 1 - Esquema básico do funcionamento de um sistema sensor usado em sensoriamento remoto. **Fonte** - Moreira, 2005.

A obtenção de MDEs é feita por meio de dados aéreos (p ex. Aviação) e orbitais (p ex. Satélites Artificiais), ou produzido por uma interpolação de dados de elevação de uma base de dados (Medeiros, Ferreira, Ferreira Jr., 2009). Há diversas missões espaciais que colocaram em órbita satélites artificiais que produziram MDEs, como a *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e a missão que colocou em órbita o satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS).

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma cooperação entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a *US National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), *US Department of Defense* (DoD), *German Aerospace Center* (DLR), e *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI). A STS-99 foi uma missão espacial com o objetivo de mapear a topografia terrestre, durou 11 dias, em Fevereiro de 2000, e mapeou cerca de 80% das áreas continentais terrestres (Grohmann, 2018) por meio de radares acoplados à nave Endeavour.

Os radares (RADAR - *Radio Detection and Ranging*) são sensores que funcionam por meio da transmissão de pulsos de microondas eletromagnéticas, que refletem nos objetos da superfície terrestre de volta para o satélite onde o radar está acoplado (Figura 2). O radar detecta esse dado e por meio do entendimento dessa reflexão, assim entendendo o objeto e o mundo a sua volta (HSAT, 2023).

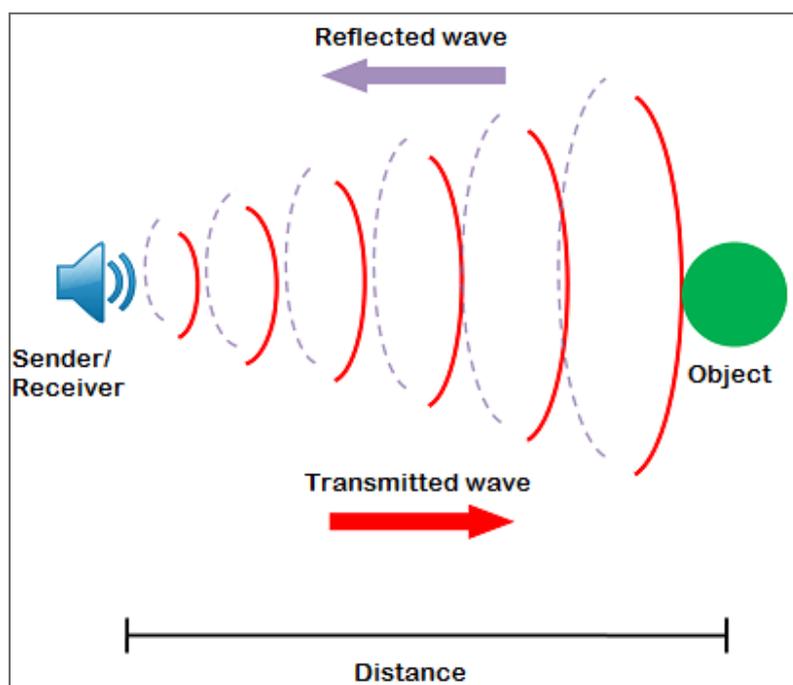


Figura 2 - Demonstração do princípio de funcionamento da tecnologia Radar. A onda transmitida pelo radar, reflete no objeto, e é detectado seu retorno. **Fonte** - HSAT, 2023.

As microondas são ondas de alta frequência, do mesmo tipo das ondas de rádio, com comprimento de onda entre 1m e 1mm e frequências de aproximadamente 10^8 Hz e 10^{11} Hz. Essas ondas se propagam em linha reta, tendo a necessidade de uma visada direta nas antenas de transmissão e recepção. As propriedades das microondas são essenciais para as tecnologias de radares, pois

quase todos os objetos refletem as microondas. Utilizando as microondas, os radares mais sofisticados conseguem detectar a distância (pelo tempo que os pulsos demoram para ir e voltar) , direção e a velocidade de quase qualquer alvo (Sousa, 2009) .

Na missão SRTM foram utilizados dois radares de abertura sintética um *Synthetic Aperture Radar* na Banda X (SAR-X) e um *Spaceborne Imaging Radar* na Banda C (SIR-C) que formaram um sistema único imageador ativo de ondas de rádio, geralmente microondas, operando independentemente (Fernandes, 1998). As banda X e C possuem comprimentos de onda entre 3,8 - 2,4 cm e 7,5 - 3,8 cm, frequência entre 8 - 12,5 GHz e 4 - 8 GHz, respectivamente (Saffe Engenharia, 2023).

Os radares foram implantados ao ônibus espacial que fez o registros das imagens por interferometria (InSAR), com visada lateral de 30° a 58° off-nadir (Carvalho, Bayer, 2008; Fernandes, 1998). A técnica de registros das imagens por interferometria utiliza o fenômeno de interferência de duas ondas eletromagnéticas, medindo a distância dos objetos (espalhadores) pela diferença dessas fases de ondas (Figura 3) (Saffe Engenharia, 2023).

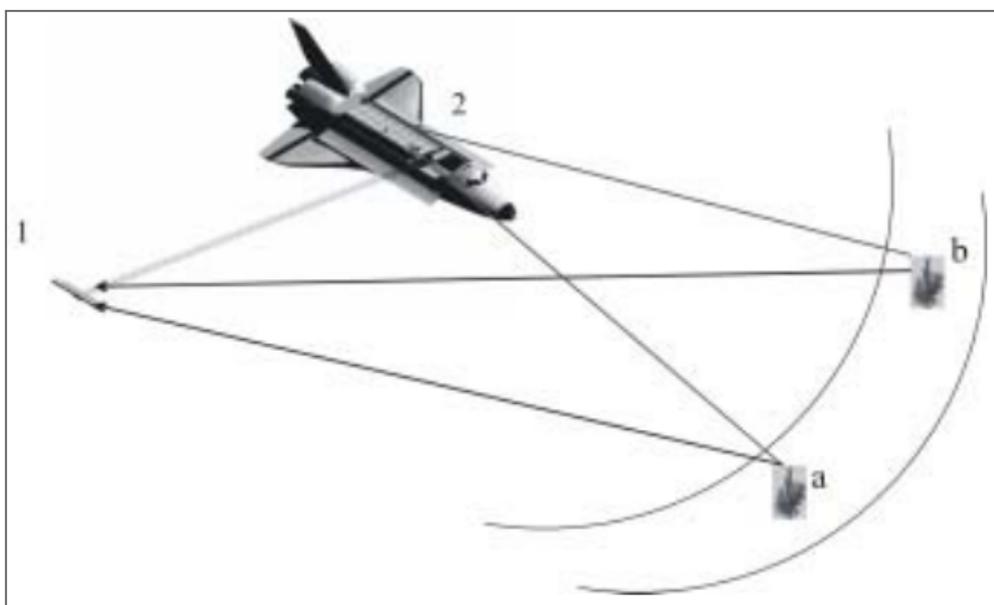


Figura 3 - O interferômetro da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), mostrando o comprimento dos caminhos até os dois espalhadores (a) e (b). Os espalhadores podem ser qualquer objeto na cena, como , folhas, galhos, solo, etc. **Fonte** - Treuhaft, Chapman, Dutra, 2006.

Os dados gerados pela missão SRTM foram processados seguindo as normas de acurácia da *US National Imagery Mapping Agency* (NIMA), eliminando erros primários como o *speckle*, granulosidade que degrada a qualidade da imagem, e *spike* (*single pixel errors* ou erros de pixels únicos). Os MDEs possuem pixels de 1 arc-second (resolução espacial de 30m) e 3 arc-seconds (resolução espacial de 90m), que respectivamente são denominados SRTM1 e SRTM3 e são distribuídos gratuitamente pela *United State Geological Survey Eros Data Center* – USGS EDC (Carvalho, Bayer, 2008).

A resolução espacial está relacionada à capacidade de um sensor de discriminar objetos em função do tamanho de seus pixels. Logo, quanto maior uma resolução espacial, menor o objeto distinguível pelo sensor (Figura 4). Por exemplo, é considerado, em geral, uma imagem com pixels de 10 m como uma imagem de alta resolução e pixels acima de 5 km como uma imagem de baixa resolução. As diferentes tecnologias e técnicas para produção de imagens MDEs são o que diferenciam suas resoluções espaciais (Meneses, 2004).

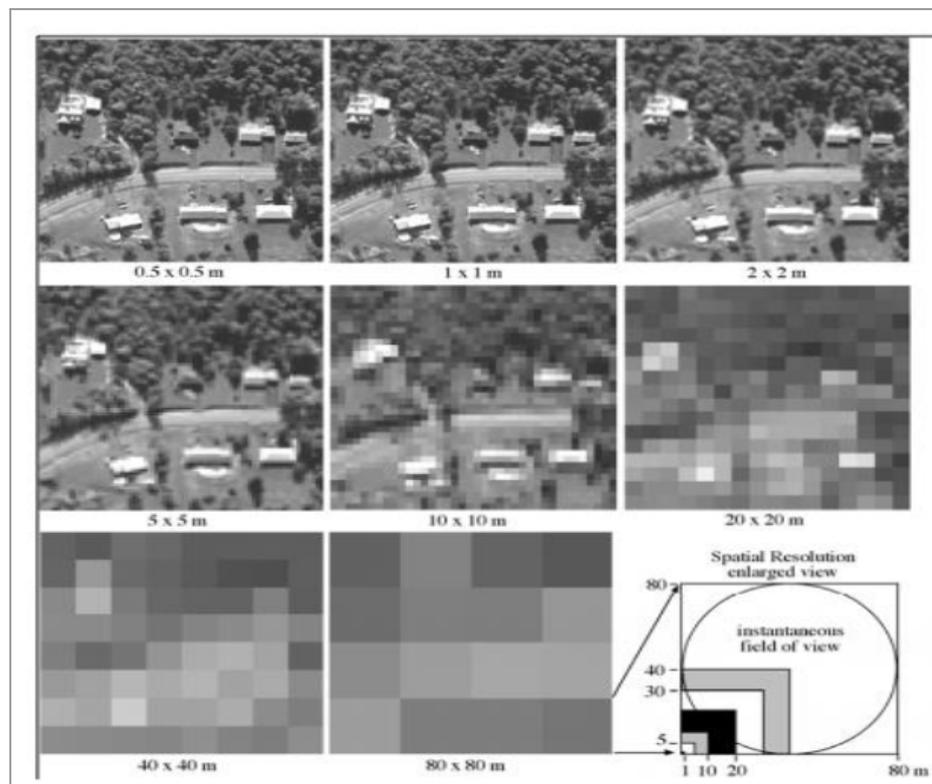


Figura 4 - Exemplo de imagens com diferentes resoluções espaciais de 0,5 m a 80 m (largura do pixel). Fonte - Lobo, Ramalho, Sinotti, 2020.

Em um radar de visada lateral, a célula ou elemento de resolução espacial é controlado por dois parâmetros independentes: Comprimento do pulso (determinado pela duração de tempo que a antena emite os pulsos de energia) e largura do feixe da antena. Cada um desses parâmetros, por serem independentes, determinam uma resolução espacial (Meneses, 2004).

O MDE SRTM foi processado em disponibilizados em diversas versões. A primeira versão dos dados da missão SRTM foi processada e disponibilizada em 2003, enquanto a versão de melhor resolução (30m) foi apenas disponibilizada com cobertura global em 2014. Durante esses anos a tecnologia evoluiu de maneira exponencial. Com o intuito de adaptar os dados da missão SRTM aos avanços da tecnologia, a NASA lançou o projeto NASADEM (NASA, 2023).

O NASADEM foi produzido com o objetivo de disponibilizar ao público de forma gratuita um modelo digital de elevação global de alta resolução, reprocessando os dados da missão SRTM. Esse novo projeto foi possível após a expiração do acordo entre a NASA e a NGA, o memorando de entendimento (MOU). Os dados do NASADEM são de 1 arc-second, logo 30m de resolução espacial (NASA, acessado em 09 de outubro de 2023).

Outro projeto de MDE em escala global é o *Alos World (AW3D)*, produzido pelo sensor PRISM (*Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping*), lançado no satélite *Advanced Land Observing Satellite (ALOS)*, em janeiro de 2006, pela *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*.

O sensor PRISM do ALOS AW3D30 coleta imagens ópticas pancromáticas (0.52–0.77 μm), de resolução 2,5m, em três posições: *nadir* - NDR; *forward* - FWD; *backward* - BWD. O PRISM possui 2 modos de imageamento, o modo triplo (OB1) - NDR, FWD e BWD, e o modo estéreo (OB2) - BWD e NDR (Figura 5) (Souza, Ramos, Marcato, 2019).

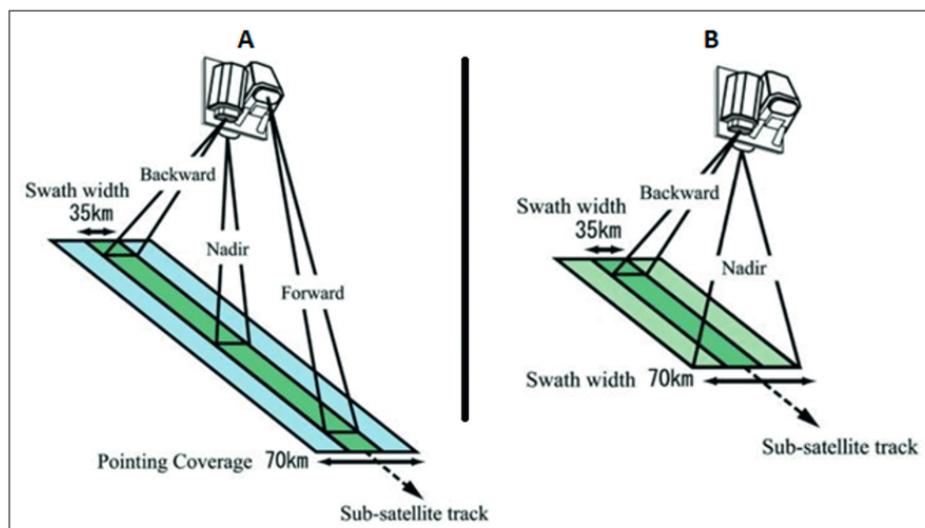


Figura 5 - Observação das geometrias do PRISM: A, modo de observação triplo (OB1), e B, modo de observação estéreo (OB2). **Fonte** - Souza, Ramos, Marcato, 2019.

Todas as cenas registradas pelo PRISM foram processadas automaticamente, com menos de 30% de cobertura de nuvens, para gerar o MDE ALOS AW3D. Em torno de 5 anos, aproximadamente cerca de 6.5 milhões de cenas foram produzidas ao longo de todo o globo terrestre. Apesar de possuir uma versão global comercial de 5m de resolução, a versão gratuita está apenas disponível na resolução de 30m e é chamada de ALOSAW3D30 (Grohmann, 2018).

Existem outras formas de obtenção de MDEs, além de imagens produzidas por satélites e disponibilizadas por agências espaciais. Um exemplo seria pela interpolação de curvas de nível, obtida por diversas plataformas digitais (p. ex GeoPortal) ou pontos de coordenadas, como pontos do software Google Earth, e altitude de alguma base de dados, como a presente no site GPS Visualizer (Chigbu, 2019; GPS Visualizer, 2023).

O GPS Visualizer utiliza uma base de dados de altitude de diferentes MDEs para pontos de todo o mundo. No caso do Brasil é utilizado dados do SRTM3 (Figura 6). De acordo com o *site* do GPS Visualizer, a plataforma também pode ser utilizada para obter os dados de elevação diretos do Google Maps API, sendo a verdadeira fonte de dados de elevação da Google, porém para obter esse dado é necessário uma chave de desenvolvedor da Google (não-gratuita) e conhecimento de linguagens de programação (GPS Visualizer, 2023).

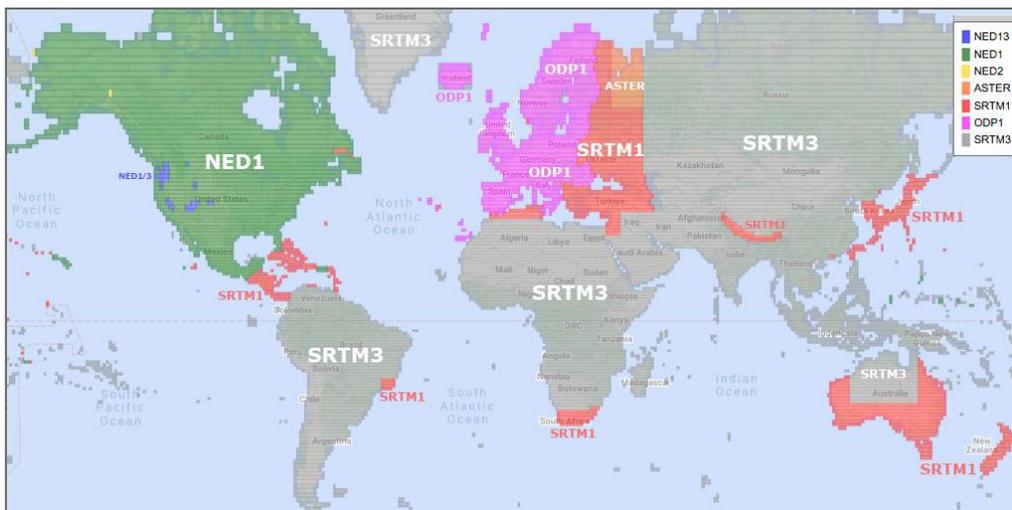


Figura 6 - Mapeamento dos MDEs utilizados na base de dados de altitude do GPS Visualizer. Fonte - GPS Visualizer, 2023.

A grande vantagem da utilização de dados de elevação interpolados para se obter um MDE é não depender dos métodos tradicionais de obtenção desse dado. Os dados de elevação interpolados produzem um Modelo Digital de Elevação, e consequentemente, como todo MDE, está suscetível a erros (Chigbu, 2019).

4. Metodologia

4.1. Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Bartolomeu abrange uma área de aproximadamente 2670 km² no Distrito Federal e 2810 km² no Goiás, sendo totalmente inserida na região do DF e entorno (RIDE), totalizando uma área de drenagem de 5480 km². Dentro dos limites da Bacia do Rio São Bartolomeu está presente Brasília e os municípios goianos, Formosa, Planaltina, Valparaíso de Goiás, Cidade Ocidental, Luziânia e Cristalina (Figura 7).

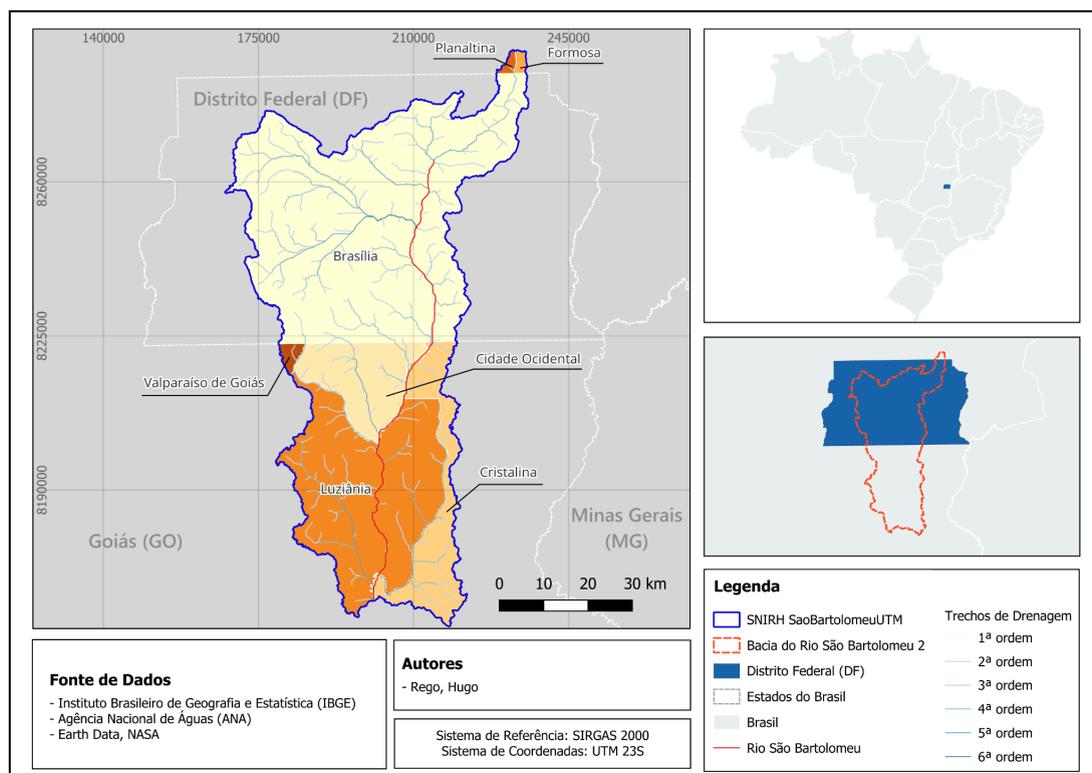


Figura 7 - Mapa da localização da Bacia do Rio São Bartolomeu com os municípios pertencentes ao estado de Goiás (GO) e sua respectiva área no Distrito Federal (DF) . **Fonte** - Elaboração própria.

O Rio São Bartolomeu é formado pelos rios Pípiripau e Mestres D'Armas e possui uma drenagem principal de aproximadamente 180 km. A direção é predominantemente norte-sul até desaguar no Rio Corumbá (Figura 8) (Sena-Souza, 2015). As bacias hidrográficas que são adjacentes à bacia do Rio São Bartolomeu são: bacia do Rio Preto, bacia do Paranã, bacia do Alto Tocantins, bacia do Descoberto, bacia do Corumbá e bacia do Alto São Marcos (Figura 8).

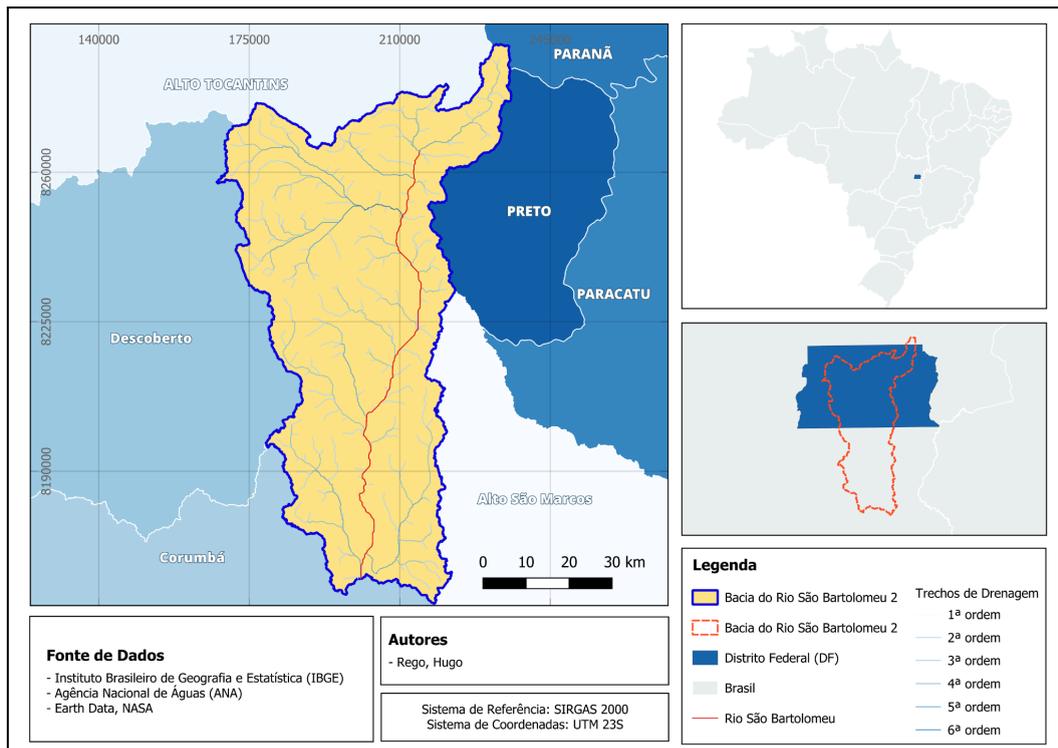


Figura 8 - Mapa da hidrografia da Bacia do Rio São Bartolomeu e suas principais bacias vizinhas.
Fonte - Elaboração própria.

A Bacia do Rio São Bartolomeu engloba diversas Unidades de Conservação (UCs), como a Área de Proteção Ambiental do São Bartolomeu, Parque Nacional de Brasília, o Jardim Botânico de Brasília e a Estação Ecológica de Águas Emendadas. Essas UCs protegem a biodiversidade, as características do Cerrado e também garantem a prestação de serviços ambientais (Arruda, Rodrigues, 2008).

4.2. Geomorfologia

A Bacia Hidrográfica do São Bartolomeu está inserida dentro do domínio morfoestrutural dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos (grandes áreas compostas por planaltos, alinhamentos serranos e depressões interplanálticas) e na região geomorfológica do Planalto do Distrito Federal (extensas chapadas e planaltos contínuos sustentados por couraças lateríticas). O domínio morfoestrutural dos Cinturões dos Móveis está associado a um padrão de falhas e dobramentos com presença de metamorfitos e granitóides (Cassetti, 2005; IBGE, 2009).

Novaes Pinto (1986), dividiu a área em três macrounidades: regiões de chapadas, área dissecada intermediária e região dissecada de vale. A Codeplan (1984), no Atlas do Distrito Federal, separou a região em superfícies de aplainamento e depressões interplanálticas dissecadas e apresentou três tipos de

escarpas para a área: erosiva, adaptada e de falhamentos. Segundo Dantas, (2003) a geomorfologia da área foi influenciada por diferentes fatores, como o fator geológico-estrutural, demonstrado pelo condicionamento das drenagens. O autor também dividiu a área em três unidades morfoesculturais: Planaltos Retocados, representados pelas chapadas elevadas do alto São Bartolomeu; Vales Encaixados, nas áreas de dissecação fluvial mais acentuadas; Domos Estruturais, representada pelo Domo de Cristalina no extremo sudeste da bacia.

4.3. Clima

A região da Bacia do São Bartolomeu é caracterizada por uma sazonalidade intensa, sendo as chuvas concentradas entres os meses de outubro e abril. A área é enquadrada, seguindo a classificação climática de Köppen-Geiger, como clima tropical úmido de savana, com inverno seco (Aw). Possui uma variação local, nas porções mais elevadas, com clima tropical de altitude (Cwa e Cwb) (Sena-Souza, 2015).

As regiões mais altas da Bacia do São Bartolomeu possuem temperatura média anual de 21° C a 22° C e em regiões mais baixas de 20 °C a 21 °C. Ao longo de toda a bacia, a média da máxima anual oscila de 27 °C a 28 °C e a mínima entre 16 °C e 17°C (Sano et al., 2008). A região possui precipitação anual média de 1.500 mm. Sendo que de Junho a Agosto a precipitação é de 50 mm, enquanto em Janeiro pode alcançar uma precipitação de 320 mm (Martins et al., 2004c). A umidade relativa do ar é muito baixa nos meses de inverno, podendo atingir níveis inferiores a 15% (Sena-Souza, 2015).

4.4. Análise de Dados

4.4.1. Aquisição dos Modelos Digitais de Elevação NASADEM e ALOS AW3D30

As imagens do MDE NASADEM e SRTM3 foram obtidas na plataforma *Earth Explorer* da NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov>), enquanto as imagens do MDE ALOS AW3D30 foram adquiridas na plataforma *Earth Observation Center* do JAXA (<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>). Para *download* das imagens é necessário o registro de conta em cada plataforma específica. Foram necessárias 4 cenas de cada modelo para análise da área de estudo (S17W049, S17W048, S16W049, S16W048). Após o *download* e inserção no software QGIS

3.30 foi construído um raster virtual com as cenas, tornando-as uma só imagem. Além disso, todas as imagens foram reprojetaadas para o Sistema de Referências de Coordenadas SIRGAS 2000 UTM 23s (região UTM da área de estudo).

4.4.2. Geração do Modelo Digital de Elevação GPS Visualizer/Google Earth

No software Google Earth Pro foi manualmente delimitado cerca de 44.223 pontos de coordenada (latitude e longitude) ao longo de toda área de estudo. Esses dados foram exportados no formato *keyhole markup language* (.kmz) e importados no site GPS Visualizer (<https://www.gpsvisualizer.com/elevation>) para obter os dados de elevação dos pontos.

O GPS Visualizer gerou um arquivo de texto (.txt) com os pontos de coordenada e seus respectivos dados de altitude. Esse arquivo foi importado como vetor no Software QGIS 3.30 e reprojetaados para o SRC SIRGAS 2000 / UTM Zone 23s. Após esse processo, os pontos de coordenadas foram interpolados utilizando a ferramenta “Interpolação TIN”, com resolução de pixel de 30m, gerando um MDE amostrado em 30m de resolução.

4.4.3. Delimitação automática de Bacias Hidrográficas

O processo de delimitação automática de Bacias Hidrográficas foi iniciado pela eliminação das reentrâncias, saliências e “vazios” do MDE, por meio do da ferramenta no QGIS 3.30 *Fill Sinks (Wang & Liu) - SAGA NEXT GEN*. A necessidade de aplicação do *Fill Sinks* vem por conta de que as áreas com depressões rodeadas por elevações com valores superiores, em geral, provocam erros no mapeamento do fluxo de escoamento gerado pelos Modelos Digitais de Elevação (Mendes et al., 2001).

A segunda etapa foi o mapeamento da direção do fluxo, que demonstra a direção do fluxo de água para cada pixel do MDE. Baseado na declividade, o fluxo de água é direcionado para a célula vizinha que possui mais declividade. Essa direção do fluxo é indicada em cada pixel por 1 de 8 valores possíveis, utilizando números binários (2^x {0...1..7}), cada valor indica uma direção para as células vizinhas (Figura 9) (Mendes et al., 2001).

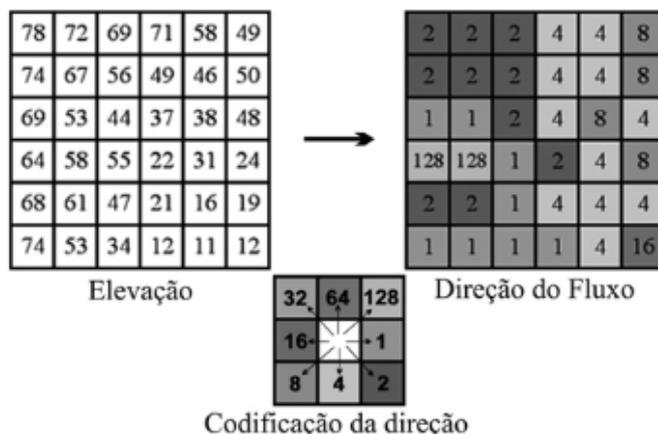


Figura 9 - Mapeamento da localização e municípios da Bacia do Rio São Bartolomeu. **Fonte** - Adaptado, ESRI, 2006.

A geração das direção do fluxo foi feita utilizando a ferramenta do plugin PCRaster, Iddcreate no QGIS 3.30, inserindo imagens pós-processo de *Fill Sinks*. Para utilizar as ferramentas PCRaster foi necessário converter as imagens para o formato PCRaster utilizando a ferramenta *Convert to PCRaster* com o tipo de saída de dados escalar.

A partir da direção de fluxo dos modelos (Figura 10) foi criado a rede de drenagem, utilizando a ferramenta *Streamorder* do Plugin PCRaster. Com a rede de drenagem é possível determinar a montante e jusante do fluxo de água e com isso definir o ponto de exutório para a geração da bacia.

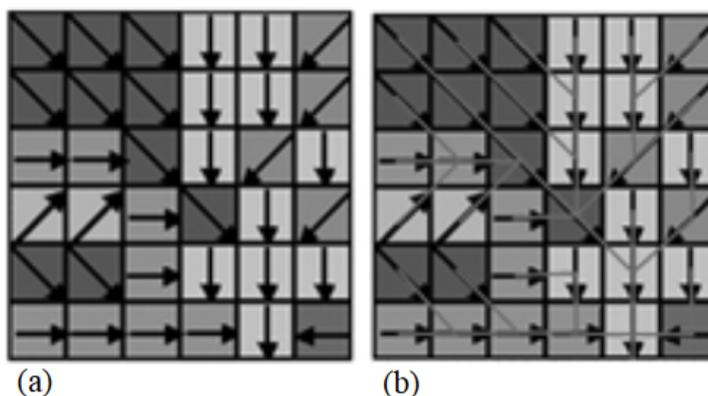


Figura 10 - Representação física do mapa de direção de fluxo - a) Com setas direcionais; b) Como uma rede de drenagem. **Fonte** - FURNANS, 2006.

Antes da definição do ponto de exutório foi utilizado a ferramenta lookup, simplificando a rede de drenagem, deixando apenas informações necessárias para gerar a bacia. O exutório para cada MDE foi definido pela visualização da rede de

drenagem (lookup), nesse ponto foi coletado a coordenada no software QGIS e essa coordenada foi inserida na ferramenta Column to PCRaster Map, junto com a rede de drenagem (lookup), gerando uma imagem raster do ponto de exutório. A imagem raster dos pontos de exutório foram inseridas, junto com a direção de drenagem (*local drainage direction*), na ferramenta Catchment (PCRaster) para gerar as bacias hidrográficas.

O mesmo processo foi realizado 3 vezes em cada MDE para gerar bacias hidrográficas bacias grandes, cobrindo toda a bacia do rio São Bartolomeu, médias (escala 1:100.000) e pequenas (1:50.000). Esses diferentes tamanhos de bacias foram analisados, pensando na possibilidade da influência do tamanho das áreas e resolução dos modelos na qualidade dos resultados obtidos.

Com o objetivo de delimitar todas as bacias sem eliminar áreas internas significativas dos limites definidos pelas bacias do SNIRH, as coordenadas escolhidas dos pontos de exutório foram diferentes, baseado em análise visual da rede de drenagem geradas por cada MDE.

4.4.4. Análise dos Modelos Digitais de Elevação

Para a análise dos modelos digitais de elevação foram delimitados 5000 pontos aleatórios dentro da área de estudo no software QGIS. Esses pontos foram utilizados para coleta dos dados de altitude em metros de cada MDE. Após esse processo, os 5000 pontos de altitude de cada modelo foram exportados no formato .XML e inseridos no software Microsoft Excel para análise da correlação entre os MDEs.

Com o intuito de analisar qualidade altimétrica dos modelos digitais de elevação foi realizado o mesmo processo com 231 referências de nível, obtidas pelas estações da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema de Geodésico Brasileiro (SGB), e pontos homólogos nos MDEs.

No software Microsoft Excel, as matrizes de pontos de altitude foram utilizadas para correlacionar os MDEs, entre si, e os MDEs e referências de nível, assim obtendo seus coeficientes de determinação R^2 . Além disso, foi realizado um processo de subtração dos pontos de altitude para obter valores onde um determinado MDE superestima ou subestima um ponto de altitude. Para a análise dos MDEs e as referências de nível, a altitude de referência foi subtraída de cada

MDE. Dessa forma, os valores positivos indicam onde o MDE superestima a altitude e negativos indicam onde o MDE subestima a altitude.

O cálculo de subtração de altitudes também foi realizado com o modelo interpolado GPS Visualizer/Google em comparação aos outros MDES. Assim, o objetivo foi de definir onde esse MDE específico se diferenciava dos outros, sendo feita a subtração de seus dados de altitude de cada modelo, obtendo valores positivos e negativos, relacionados a superestimação e subestimação, respectivamente.

De posse dos dados de subtração de pontos de altitude foram realizadas análises estatísticas (distribuições de frequência, média, valor máximo e mínimo, erro médio quadrático e desvio padrão) com o objetivo de avaliar a precisão dos MDEs em relação às referências de nível e associação entre o MDE Interpolado e os MDEs já disponíveis em raster (NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3).

4.4.5. Análise da delimitação automática de Bacias Hidrográficas

A análise das bacias geradas foi realizada pela comparação da sobreposição dos limites da delimitação automática, com os limites das bacias otocodificadas aplicado um buffer de 100m, 250m e 500m. As Ottobacias codificadas são bacias delimitadas manualmente pela Secretaria Nacional de Geologia e Mineração com base nas cartas topográficas à escala 1:250.000 elaboradas pelo IBGE (Medeiros, Ferreira, Ferreira Jr., 2009). Atualmente, as ottobacias devem ser tomadas como base das pesquisas relacionadas às bacias hidrográficas (Victor, Gomes, Barros, 2011).

Esse processo iniciou pela vetorização das imagens rasters das bacias geradas pela ferramenta no QGIS “Raster para vetor (poligonizar). Após esse processo, os vetores gerados de cada bacia foram transformados apenas em linhas pela ferramenta “ Polígonos para linhas” e aplicados um buffer de 5 metros para análise da porcentagem de sobreposição dos limites das bacias geradas automaticamente e as Ottobacias, da rede hidrográfica codificadas segundo o método de Otto Pfafstetter. A porcentagem de sobreposição foi calculada pela ferramenta “análise de sobreposição” em camadas de 100m, 250m e 500m de buffer aplicados às Ottobacias.

Além disso, também foi analisado visualmente as diferenças na interpretação do modelo das redes de drenagem, que resultaram em coordenadas de pontos de exutório diferentes, ocasionando em uma variação nos limites das bacias.

5. Resultados e Discussão

5.1. Análise dos Modelos Digitais de Elevação

As dificuldades de obtenção dos dados são critérios que fazem parte de uma avaliação. No caso dos modelos digitais de elevação do estudo, os modelos elevação NASADEM e SRTM3 foram os de maior facilidade de obtenção, necessitando apenas o registro no site da NASA e download em uma plataforma de fácil entendimento. A obtenção do MDE Alos AW3D30 também necessitou apenas um registro na plataforma, porém a plataforma de download não era intuitiva e moderna como a do modelo NASADEM.

Para gerar o MDE Interpolado GPS Visualizer/Google foi necessário um longo e dificultoso processo. A necessidade de delimitar os pontos manualmente no *software* Google Earth é uma tarefa longa e cansativa, e a plataforma GPS Visualizer é datada e de difícil entendimento. Além disso, para gerar um modelo de alta qualidade é preciso uma alta quantidade de pontos, gerando uma alta capacidade de processamento ao inseri-los no *software* QGIS.

Todos os coeficientes de determinação (R^2) observados foram maiores que 0,99, indicando uma alta associação entre os MDEs analisados. Uma diferença visual pode ser observada na dispersão dos pontos dos gráficos gerados, onde os MDEs de resolução de 30m (NASADEM e Alos AW3D30), com maior resolução espacial, apresentaram pontos menos dispersos, resultando em um alto valor de R^2 de 0,9991. Para a relação entre o NASADEM e SRTM3, houve uma dispersão na altitude próxima a 1050 m, resultando em um valor de R^2 de 0,9988. Na relação Alos AW3D30 e SRTM3 foi observado, além da dispersão na altitude próxima à 1050 m, outra dispersão a 1150 metros de altitude, resultando em um valor de R^2 de 0,9981 (Figura 11).

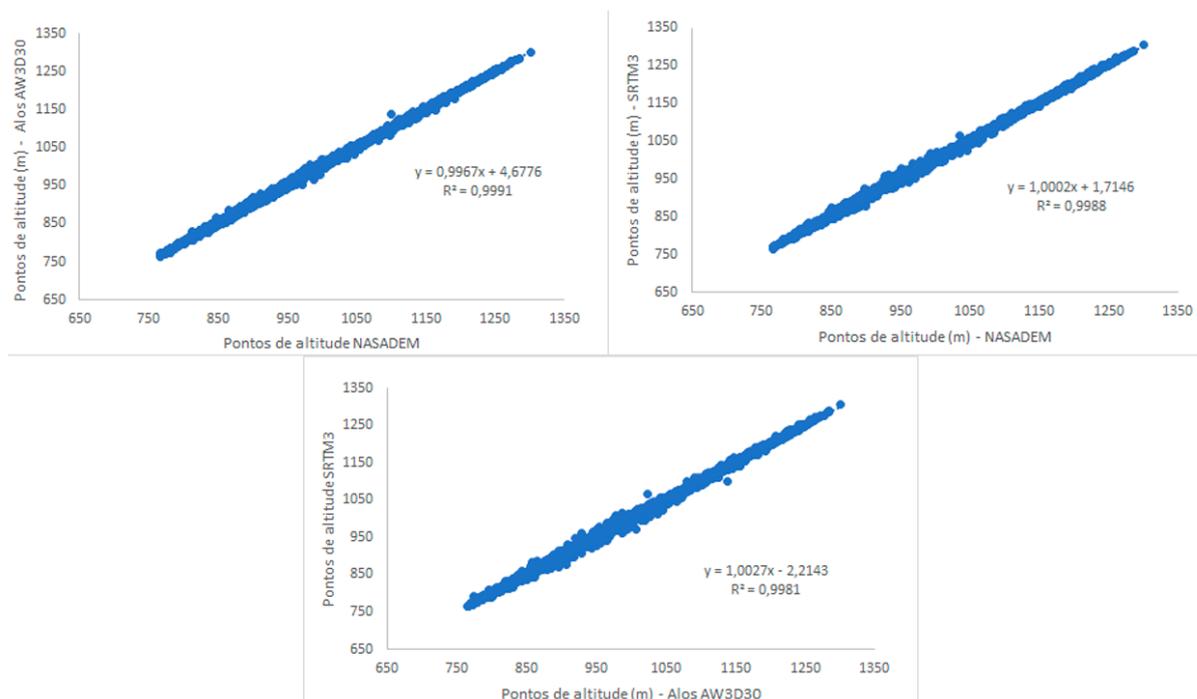


Figura 11 - Correlação dos dados de altitude dos modelos digitais de elevação NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3. **Fonte** - Elaboração própria.

As análises entre o MDE interpolado GPS Visualizer/Google e os MDEs rasters geraram retas que visualmente apresentaram uma dispersão maior entre os pontos quando comparado com as relações apresentadas na Figura 11, porém ainda com valores altos de R^2 , sendo todos acima de 0,99 (Figura 12). A relação NASADEM e SRTM3 com o MDE interpolado apresentaram os mesmos valores de R^2 , sendo 0,9935. Uma menor associação, com R^2 de 0,9929 foi observada com MDE Alos AW3D30 (Figura 12).

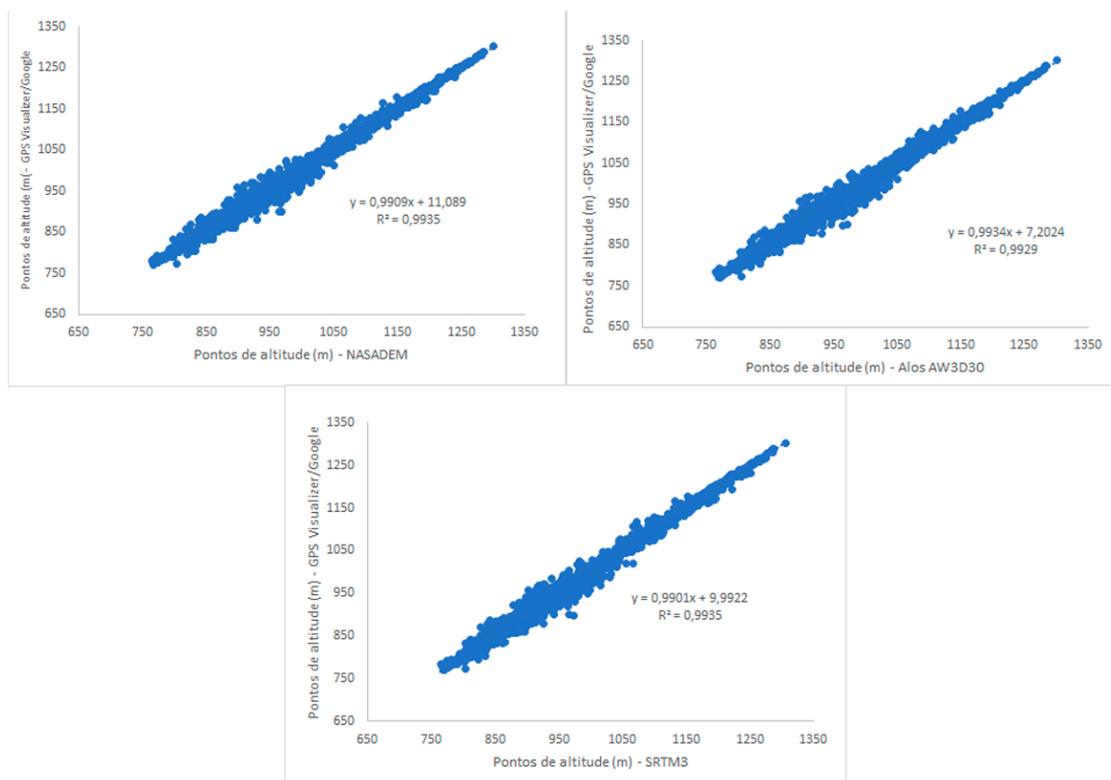


Figura 12 - Correlação dos dados de altitude dos modelos digitais de elevação inteprorado Google Visualizer com os modelos digitais de elevação NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3. **Fonte** - Elaboração Própria.

A distribuição das frequência de diferenças entre o MDE Interpolado GPS Visualizer/Google e os MDEs rasters revelam resultados interessantes, principalmente pela obtenção de pontos de valores 0, que revelam que os pontos dos dois MDEs possuem o mesmo dado sobre a altitude, sendo considerados pontos de acerto. Nesse caso, o modelo que possui pontos de valor 0 com o modelo interpolado GPS Visualizer/Google é o modelo SRTM3 (523 pontos), seguido pelo modelo Alos AW3D30 (481 pontos) e NASADEM (407 pontos). Essa análise é um grande indício de que os dados de altitude do Brasil do site GPS Visualizer, realmente, são obtidos do modelo SRTM3 (Figura 13).

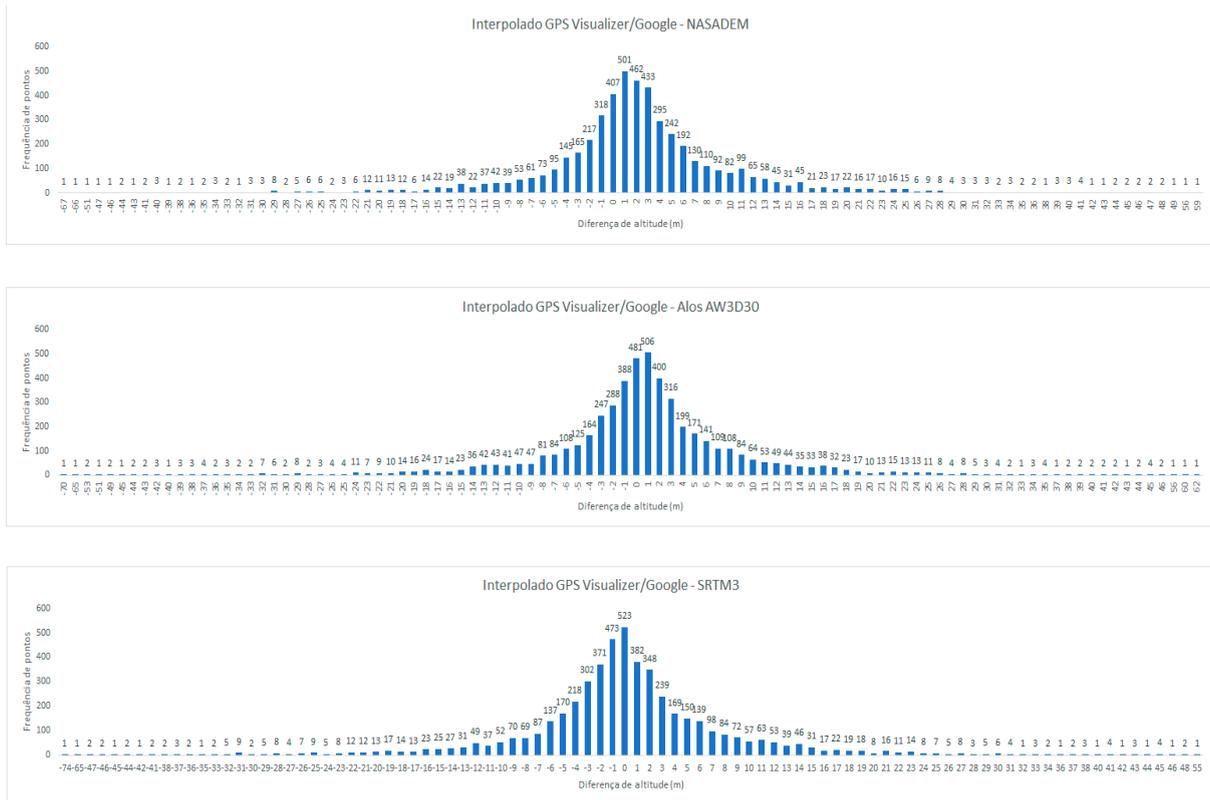


Figura 13 - Distribuição das frequências das diferenças de altitude entre o MDE Interpolado GPS/Visualizer e os MDE rasters (NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3). **Fonte** - Elaboração própria.

A média de erros entre o modelo interpolado GPS Visualizer/Google e SRTM3 se aproxima de 0, com 0,15. O valor de erros médios quadráticos (EQM), que dão maior peso aos erros ao elevá-los ao quadrado, entre esses dois modelos também são os menores, indicando uma maior relação entre os dois (Tabela 1).

Apesar do SRTM3 obter resultados mais próximos do modelo Interpolado GPS Visualizer/Google, os modelos NASADEM e Alos AW3D30 também obtiveram resultados de alta correlação. Apesar do Alos AW3D30 ter a menor média de erros, próxima a 0, com 0,67, seus valores de máximo e mínimo tiveram uma maior amplitude de resultados (de -70 metros a 62 metros), demonstrando o maior desvio padrão (8,88) e EMQ (86,33) da análise, enquanto os resultados o NASADEM teve média de erros (2,06) maior que o Alos AW3D30, todos os outros valores foram menores. Isso demonstra que o modelo Alos AW3D30, apesar de possuir maior quantidade de pontos de acerto, seus dados tiveram maiores erros, sendo um modelo mais instável na correlação com o modelo Interpolado GPS Visualizer/Google do que o modelo NASADEM (Tabela 1).

Tabela 1 - Estatística básica (Média, Desvio Padrão, Valor Máximo e Mínimo e Erro Médio Quadrático) das diferenças de altitude entre o MDE Interpolado GPS/Visualizer e os MDE rasters.

	NASADEM	Alos AW3D30	SRTM3
Média	2,06	0,67	0,15
Desvio padrão	8,88	9,29	8,89
Valor Máximo	59	62	55
Valor Mínimo	-67	-70	-74
EMQ	83,11	86,83	79,13

EMQ: Erro Médio Quadrático. **Fonte** - Elaboração Própria.

A correlação entre os modelos digitais de elevação e as referências de nível (Figura 14) demonstram uma maior coeficiente de determinação o entre o modelo NASADEM (0,9747), seguido por Alos AW3D30 e SRTM3 (0,9743) e Interpolado GPS Visualizer/Google (0,9713). Todos apresentaram alto índice de associação, por serem acima de 0,97.

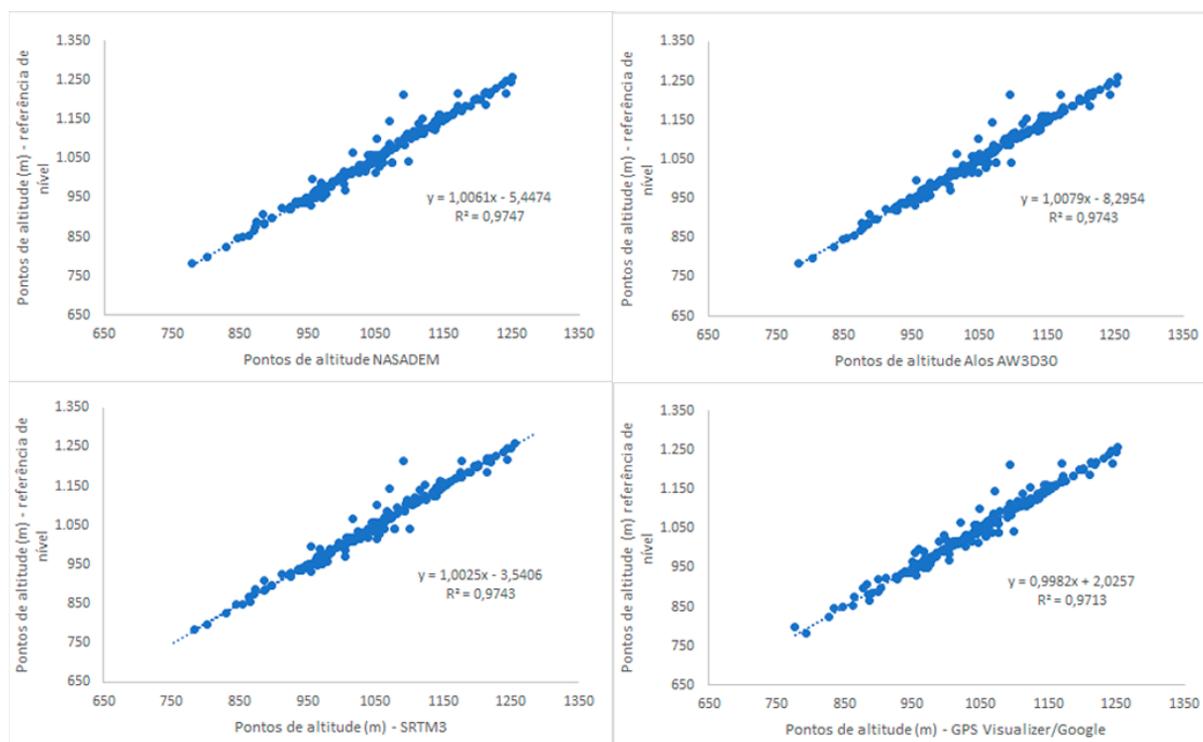


Figura 14 - Correlação dos dados de altitude das referências de nível com os modelos digitais de elevação NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3 e Interpolado GPS Visualizer/Google. **Fonte** - Elaboração própria.

Nas análises de distribuição das frequências das diferenças entre os MDEs e as referências de nível, os modelos que mais tiveram pontos de acerto (valor 0) foram o NASADEM (22 pontos), seguido pelo Alos AW3D30 (20 pontos), SRTM3 (16 pontos) e Interpolado GPS Visualizer/Google (15 pontos). É notável a semelhança entre o SRTM3 e o GPS Visualizer/Google na análise, principalmente, por conta da quantidade de valores 0 e valores 1 (SRTM3 com 31 pontos e Interpolado GPS Visualizer/Google com 28 pontos) serem semelhantes. Pode ser observado que entre o NASADEM e Alos AW3D30, provavelmente por causa de possuírem a mesma resolução, também se assemelham no quesito de acertos, tendo quantidade de valores 0 muito próxima (Figura 15).

Os autores Souza, Marcato Jr., (2019) ao utilizarem a RAAP fizeram a conversão de altitude elipsoidal para altitude ortométrica. Essa conversão é feita pela subtração da ondulação geoidal das altitudes, obtidas pela utilização, geralmente, de softwares pagos para formatação e inserção no software MapGeo 2015. Esse processo não foi realizado na metodologia do estudo, logo a obtenção de diferenças de altitudes não são precisas o suficiente para a classificação de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográficas (PEC). Ainda sim esses dados servem para análise de qual MDE possui mais acertos e erros drásticos de altitude.

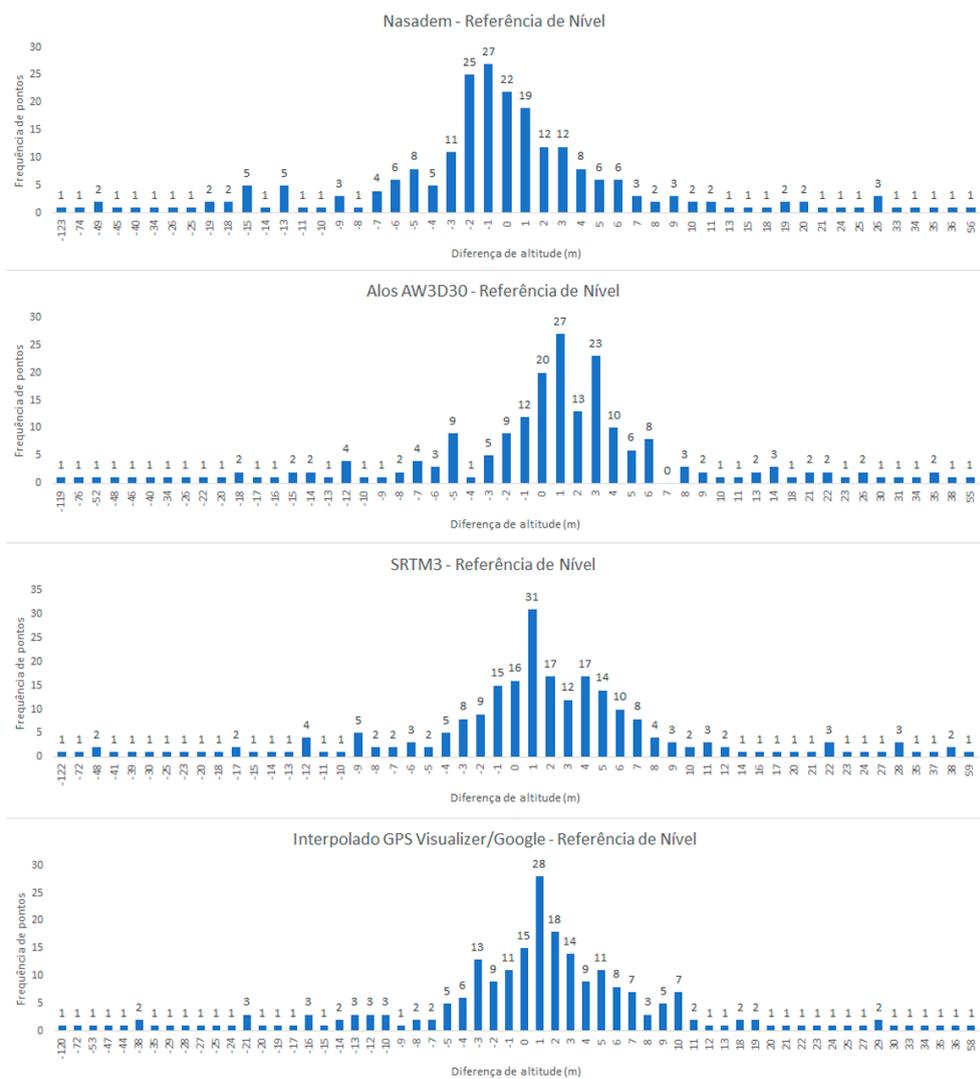


Figura 15 - Distribuição das frequências das diferenças de altitude entre os MDEs NASADEM, Alos AW3D30, SRTM3 e Interpolado GPS/Visualizer com as 231 referências de nível. **Fonte** - Elaboração própria.

Tabela 2 - Análises estatísticas (Média, Desvio Padrão, Valor Máximo e Mínimo e Erro Média Quadrático) das diferenças de altitude entre os MDEs rasters e as 231 referências de nível.

	NASADEM	Alos AW3D30	SRTM3	Interpolado GPS Visualizer/Google
Média	-1,01	-0,06	0,86	-0,22
Desvio padrão	14,96	15,09	15,08	15,97
Valor Máximo	56	55	59	58
Valor Mínimo	-123	-129	-122	-120
EMQ	224,73	227,57	228,26	254,93

EMQ: Erro Médio Quadrático **Fonte** - Elaboração Própria.

As análises estatísticas de média, desvio padrão, valor máximo e mínimo e EMQ das diferenças dos erros entre os MDEs rasters e as 231 referências de nível não demonstraram diferenças significativas. É surpreendente que o modelo SRTM3, apesar de possuir uma menor resolução, obteve resultados de alta qualidade semelhantes aos modelos NASADEM e Alos AW3D30.

Em uma análise entre os resultados dos modelos NASADEM e Alos AW3D30 observou-se o mesmo padrão obtido das análises estatísticas das diferenças entre os modelos rasters com o MDE Interpolado GPS Visualizer/Google, onde os valores de média de erros é mais próximo de 0, porém todos os outros valores são maiores. Uma diferença no padrão seria que nesse caso o NASADEM obteve maior quantidade de acertos do que o modelo Alos AW3D30, sendo levemente mais estável e confiável.

O modelo digital de elevação Interpolado GPS Visualizer/Google teve resultados muito parecidos com os outros, porém o seu valor de erro médio quadrático foi maior, sendo 254,93, demonstrando que é o MDE do estudo que possui erros de maior diferença em relação às referências de nível escolhidas.

5.2. Análise da delimitação automática de Bacias Hidrográficas

A delimitação das bacias hidrográficas médias e pequenas dos modelos digitais de elevação raster do estudo não tiveram grandes variações, porém em relação à bacia grande, cujo o objetivo era delimitar toda a bacia do rio São Bartolomeu, foi observado resultados de grande diferença devido a erros na interpretação da rede de drenagem dos modelos NASADEM e Alos AW3D30. Foi observado, no sul da bacia desses dois modelos, que foi delimitado uma sub-bacia a mais que não faz parte da delimitação de ottobacias da bacia do rio São Bartolomeu (Figura 16).

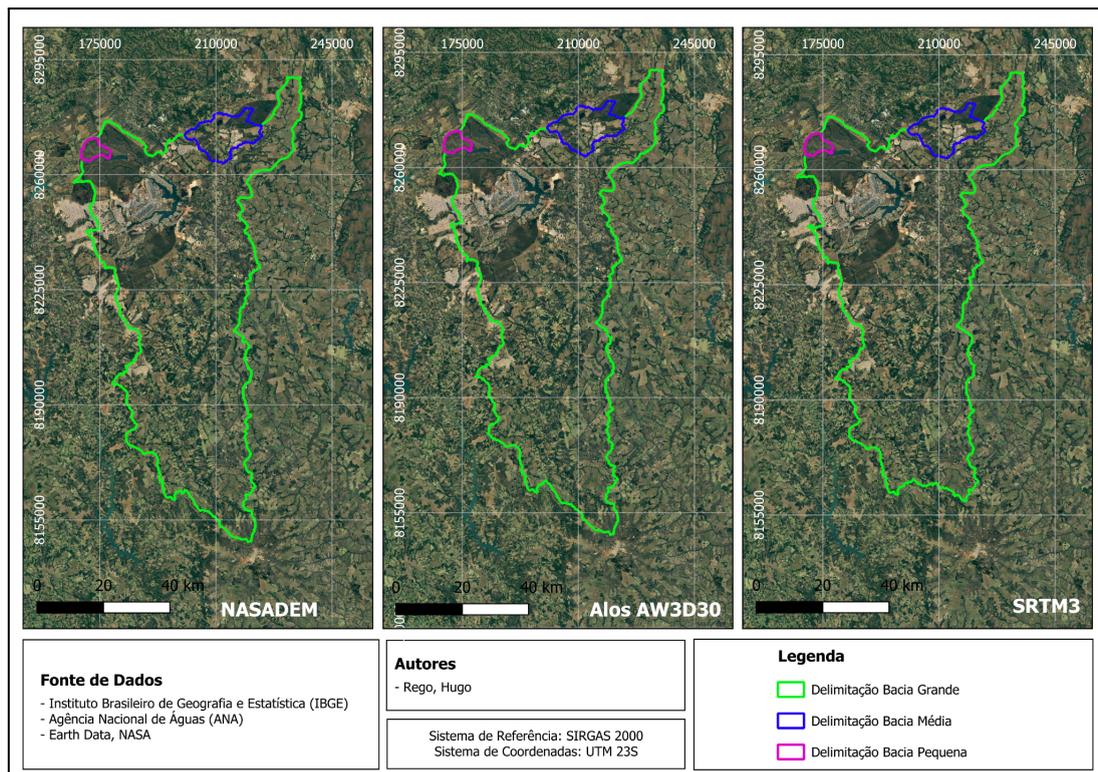


Figura 16 - Bacias Grandes (Verde), Médias (Azul) e Pequenas (Rosa) delimitadas pelos MDEs NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3. **Fonte** - Elaboração própria.

O erro de interpretação das redes de drenagem do modelos NASADEM e Alos AW3D30 ocorreu devido a resolução de 30 metros, que ao chegar à área do rio São Bartolomeu, que possui uma distância maior que 30 metros de uma margem até a outra, se confunde em relação à declividade do rio que não é captada, resultando em um encontro do rio a oeste e o rio São Bartolomeu abaixo do ponto onde isso ocorre na realidade. Nesse novo ponto, o rio a leste, que está fora da otobacia do rio São Bartolomeu, acaba entrando em contato com a rede de drenagem do rio principal antes do rio a leste, invertendo a ordem da realidade e resultando em uma delimitação de bacia que adiciona uma sub-bacia a mais (Figura 17).

O modelo SRTM3 obteve um resultado que maior condizia com a realidade, por se favorecer da simplificação das redes de drenagem a uma resolução de 90m. Dessa forma, podemos observar que o rio à oeste do ponto de exutório entra em contato com a rede de drenagem do rio principal antes do rio à leste, resultando em uma delimitação que não adiciona uma sub-bacia a mais e que gera uma delimitação muito mais próxima da delimitação de otobacias codificadas da bacia do rio São Bartolomeu.

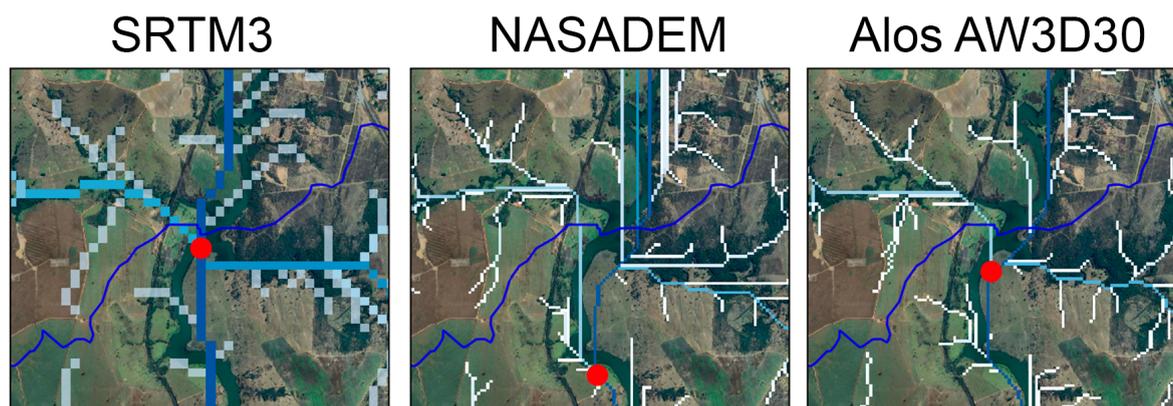


Figura 17 - Pontos de exutório em vermelho definidos com base na rede de drenagem de cada MDE para a delimitação da bacia total do rio São Bartolomeu. **Fonte** - Elaboração própria.

As coordenadas dos pontos de exutório definidos para a delimitação das bacias utilizando cada MDE pode ser visualizada a seguir:

Tabela 3 - Coordenadas UTM dos pontos de exutório para a delimitação das bacias grandes, médias e pequenas utilizando os MDEs NASADEM, Alos AW3D30 e SRTM3.

		NASADEM	Alos AW3D30	SRTM3
Coordenadas UTM dos pontos de exutório	Bacia Grande	200445.85L, 8163370.70N	200428.86L, 8164355.95N	200509.1L, 8164608.0N
	Bacia Média	214544.2L, 8264954.0N	214622.54L, 8265148.83N	214509.1L, 8265079.7N
	Bacia Pequena	178081.66L, 8265245.40N	177879.16L, 8265326.87N	177914.6L, 8265171.6N

Fonte - Elaboração Própria.

Tanto o NASADEM e o Alos AW3D30 delimitaram apenas uma bacia a mais, logo as diferenças entre os dois não foram tão significativas. A diferença entre os dois modelos ocorreu apenas nas áreas próximas dos pontos de exutório, por serem em coordenadas diferentes (Figura 18).

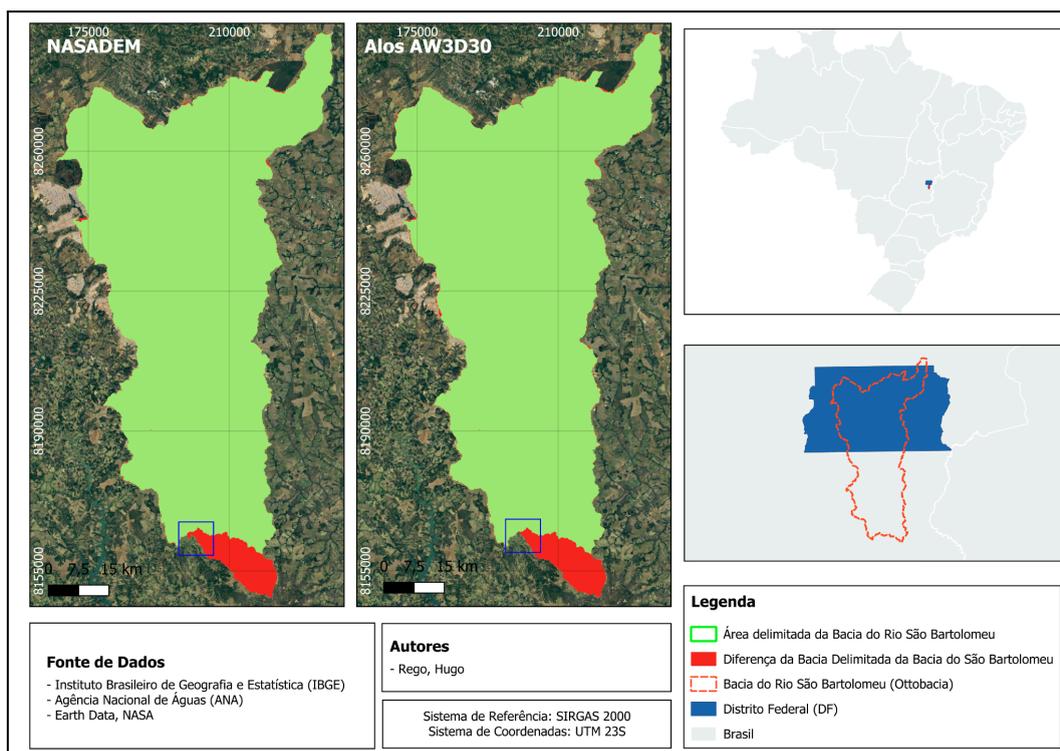


Figura 18 - Bacias delimitadas automaticamente pelos MDEs NASADEM e Alos AW3D30. Em verde está a área da Ottobacia do rio São Bartolomeu e em vermelho a diferença na delimitação automática de cada MDE. **Fonte** - Elaboração própria.

O MDE Interpolado GPS Visualizer/Google resultou em uma rede de drenagem confusa e que não condiz com a realidade em muitas áreas, principalmente próximo ao exutório da bacia grande. Assim, não foi possível delimitar a bacia grande pela alta irregularidade da rede de drenagem na área. A rede de drenagem nas áreas das bacias grandes e médias seguiam minimamente a lógica da rede de drenagem dos outros MDEs, o que tornou possível a delimitação dessas bacias (Figura 19).

Além disso, a rede de drenagem apresentou padrões de triângulos irregulares por conta do método de interpolação TIN, que não representavam tão bem a fluidez de uma rede de drenagem. Outros métodos de interpolação foram testados, porém pela alta quantidade de pontos o tempo de processamento foi muito longo. Logo, não sendo um método de interpolação funcional.

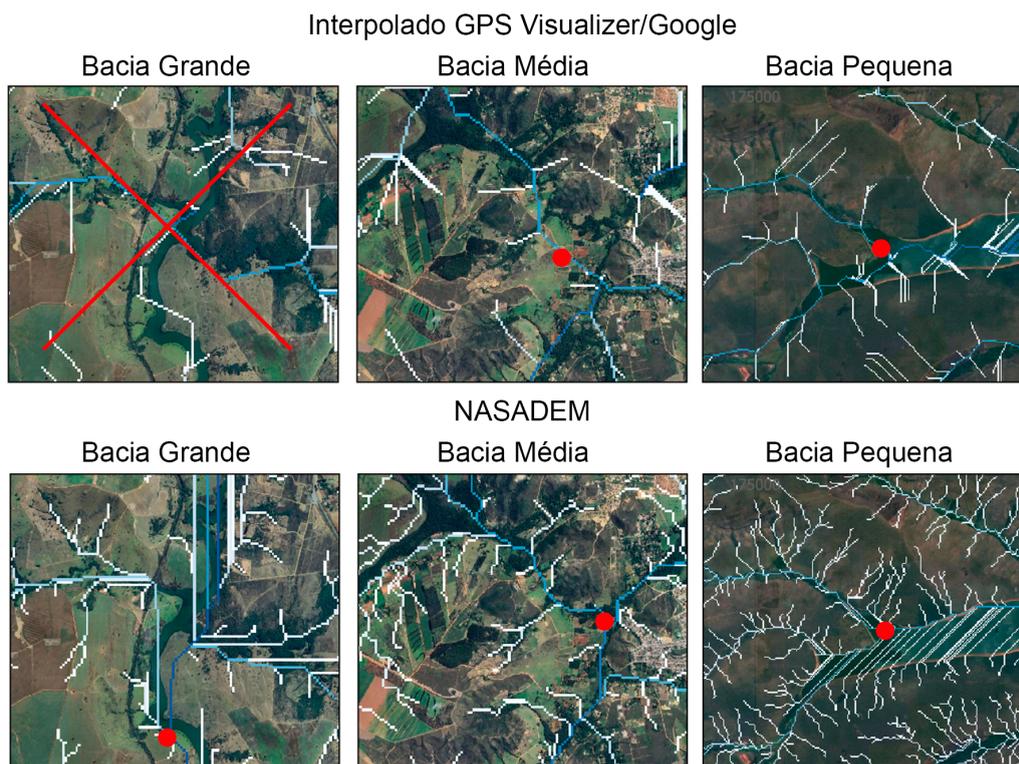


Figura 19 - Pontos de exutório em vermelho definidos com base na rede de drenagem de do MDE Interpolado GPS Visualizer/Google e NASADEM para a delimitação da bacia grande, média e pequena. **Fonte** - Elaboração própria.

As coordenadas dos pontos de exutório definidos para a delimitação das bacias utilizando o MDE Interpolado GPS Visualizer/Google pode ser visualizada a seguir:

Tabela 4 - Coordenadas UTM dos pontos de exutório para a delimitação das bacias médias e pequenas utilizando o MDE Interpolado GPS Visualizer/Google.

		Interpolado GPS Visualizer/Google
Coordenadas UTM dos pontos de exutório	Bacia Grande	-
	Bacia Média	213917.77L, 8264826.81N
	Bacia Pequena	177928.57L, 8265124.68N

Fonte - Elaboração Própria.

A bacia média e pequena gerada pelo modelo Interpolado GPS Visualizer/Google já na fase de análise visual pode observar grandes diferenças em relação à Ottobacia codificada (Figura 20).

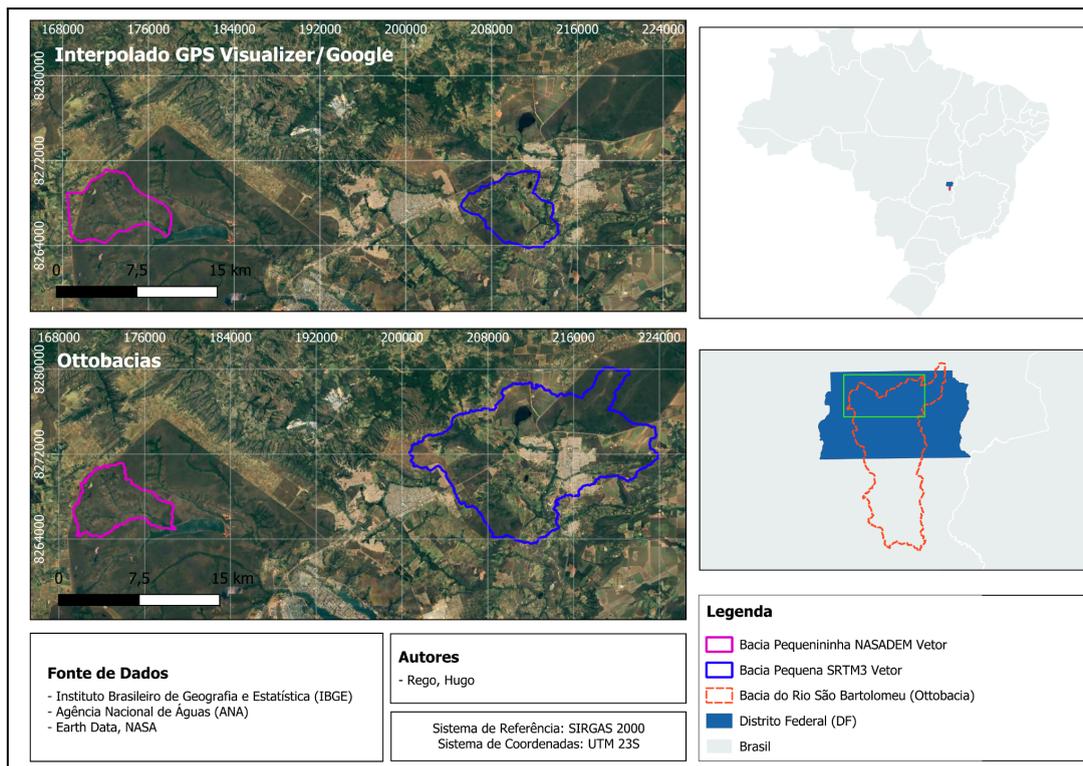


Figura 20 - Em cima, bacia média e pequena delimitadas automaticamente pelo MDE Interpolado GPS Visualizer/Google e em baixo as Ottobacias codificadas para as duas áreas. **Fonte** - Elaboração própria.

As análises de sobreposição dos limites dos MDEs com as ottobacias codificadas revelaram resultados surpreendentes. Apesar de já ser esperado pela análise visual que a bacia grande do NASADEM e Alos AW3D30 teria uma menor sobreposição de limites do que o SRTM3 por conta de delimitar uma sub-bacia a mais, não era esperado que o SRTM3 obteria um maior desempenho que ambos os modelos em relação a delimitação da bacia média e em relação à bacia pequena um maior desempenho que o Alos AW3D30. O SRTM3 só teve menor desempenho que o NASADEM na análise de limites da bacia pequena, porém a diferença é bem pequena (Tabela 5).

Deve-se analisar se o desempenho do Alos AW3D30 foi de menor rendimento que o do SRTM3 por conta de suas cenas, captadas pelo PRISM, terem sido processadas automaticamente (Grohmann, 2018), diferentemente do SRTM3, que teve uma etapa de pós-processamento, seguindo as normas de acurácia da Agência de Inteligência Geoespacial dos Estados Unidos (NIMA) (Carvalho, Bayer, 2008). Essa diferença também pode ter sido ocasionada pontualmente na área escolhida, logo a realização do mesmo processo em diferentes áreas pode levar a fortalecer ou descartar essa teoria.

A rede de drenagem dos modelos pode ser melhorada por um processo de *stream burning*. No caso do estudo, poderia ser utilizado uma camada vetorial do rio São Bartolomeu para “queimar” no MDE a drenagem do rio principal (Lindsay, 2016). Assim, os MDEs NASADEM e Alos AW3D30, poderiam contornar os problemas gerados de má interpretação em áreas onde o rio possuía um tamanho maior que 30m de uma margem à outra, fazendo com que não fosse delimitado uma sub-bacia a mais da bacia grande, por exemplo.

O modelo Interpolado GPS Visualizer/Google foi o que obteve resultados com o menor desempenho do estudo, o único modelo em que obteve valores em porcentagem de sobreposição abaixo de 50% (Tabela 5). Assim, sendo um modelo de baixíssima confiabilidade, não sendo um método recomendado para delimitação automática de bacias. Para melhorar os resultados obtidos, provavelmente, é necessário a obtenção de mais pontos para interpolação, um processo extremamente e que requer uma alta capacidade de processamento ao manuseá-los nos softwares de SIG.

Tabela 5 - Porcentagem de sobreposição dos limites das bacias geradas a um buffer de 500m, 250m, 100m nos limites das Ottobacias codificadas.

		Porcentagem de sobreposição dos limites		
Buffer		500 metros	250 metros	100 metros
NASADEM	Bacia Grande	90,7	86,9	75,3
	Bacia Média	100,0	95,0	77,8
	Bacia Pequena	98,9	89,4	73,7
Alos AW3D30	Bacia Grande	90,9	84,7	61,8
	Bacia Média	97,5	88,2	66,4
	Bacia Pequena	93,4	88,0	62,4
SRTM3	Bacia Grande	99,8	96,6	82,1
	Bacia Média	100,0	97,7	80,4
	Bacia Pequena	96,2	89,9	68,8
Interpolado GPS Visualizer/Google	Bacia Grande	-	-	-
	Bacia Média	50,5	41,7	25,3
	Bacia Pequena	82,3	73,1	43,6

Fonte - Elaboração Própria.

6. Conclusão

Os MDEs rasters possuem dados de altitude semelhantes, com pequenas diferenças dos valores em metros. Foi observado que o critério de resolução espacial e sua relação com a rede drenagem foi muito mais determinante para a delimitação automática de uma bacia hidrográfica do que a diferença valores pontuais de altitude das referências de nível escolhidas.

Assim, apesar dos dados de altitude presentes nos MDEs NASADEM e Alos AW3D30 terem obtido mais pontos de acerto que o MDE SRTM3 em relação às referências de nível do estudo, o MDE SRTM3 obteve um melhor desempenho na delimitação automática das bacias hidrográficas, pois se beneficiou pela simplificação da rede de drenagem de grandes áreas por conta de sua resolução de 90m. O MDE NASADEM teve melhor desempenho que o SRTM3 apenas na delimitação da bacia pequena (1:50.000), onde sua maior resolução se demonstrou vantajosa na interpretação de áreas menores.

O MDE Alos AW3D30 obteve um desempenho menor que o modelos SRTM3 em todas as bacias delimitadas, inclusive na delimitação da bacia de menor escala, 1:50.000. O MDE Interpolado GPS Visualizer/Google demonstrou estar mais relacionado ao SRTM3, indicando que sua base de dados são do MDE SRTM3 como é descrito no site GPS Visualizer. Porém, mesmo com essa proximidade de dados de altitude, o MDE não obteve resultados satisfatórios na delimitação automática de bacia hidrográfica e não é recomendado sua utilização em estudos hidrológicos.

Referência Bibliográfica

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

ARRUDA, M. B.; PROENÇA, C. E. B.; RODRIGUES, S. C.; CAMPOS, R. N.; MARTINS, RENATA C.; MARTINS, E. S.. Ecorregiões, Unidades de Conservação e Representatividade Ecológica do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. Cerrado: Ecologia e Flora. [S.I.]: **Embrapa**, v. 1. Cap. 8, p. 229-270. 2008.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (orgs.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

BUARQUE, D. C. et al. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 14 p. 91-103, 2009

BURROUGH, Peter A.; MCDONNELL, Rachael A.; LLOYD, Christopher D. Principles of geographical information systems. **Oxford university press**, 2015.

BRASIL. Lei Nº 9.433, DE 8 de Janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm > Acessado em 06 de dez. de 2023.

CARVALHO, T. M. de; BAYER, M. Utilização dos Produtos da “SHUTTLEADARTOPOGRAPHYMISSION” (SRTM) no Mapeamento Geomorfológico do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. I.], v. 9, n. 1, 2008. DOI: 10.20502/rbg.v9i1.99.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.I.], 2005.

CHIGBU, N. et al. Comparative Analysis of Google Earth Derived Elevation with In-Situ Total Station Method for Engineering Constructions. **FIG WW**, Hanoi, Vietnam 2019.

CODEPLAN, Companhia de Planejamento do Distrito Federal. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília, 1984.

DANTAS, M. E. Geomorfologia. In: CPRM; EMBRAPA; SCO-MI. **Zoneamento ecológico-econômico da região integrada de desenvolvimento do Distrito Federal**: Fase I. Rio de Janeiro, 2003. v. 2, p. 1-29.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop help**. Redlands, 2006.

FERNANDES, D. 11_41p - Imagens de Radar de Abertura Sintética como instrumento de auxílio na avaliação do impacto ambiental. **Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 733-744.

FURNANS, J. E. **Topologic Navigation and the Pfafstetter System**. 2001. 214f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia) - The University of Texas, Austin, 2001.

GALVÃO, Wougran Soares; MENESES, Paulo Roberto. Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, v. 12, p. 2511-2518, 2005.

GROHMANN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 121–133, jun. 2018.

HSAT. Sattelites: Radas Satellite Basics. Disponível em: <<https://hsat.space/satellites-radar-satellite-basics/>> Acessado em 02 de ago. de 2023.

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

LANDAU, Elena Charlotte; GUIMARÃES, Daniel Pereira. **Análise comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM e TOPODATA**. 2011.

LILLESAND, T e Kiefer, R. Remote sensing and image interpretation. New York, United States of America: **John Wiley & Sons**. 3ª Edition. 1994. 750p.

- LINDASY, J. B. The practice of DEM stream burning revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, **Earth Surf. Process Landforms - 41**, 2016, 41, p. 658–668.
- MARTINS, E. S.; REATTO, A.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F. Unidades de paisagem do Distrito Federal, escala 1:100.000. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2004c. p. 22.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia** No 61/02, 2009.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 2001, 536 p.
- MENESES, P. R. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2004.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3a ed. UFV. Viçosa MG, 2005. 320p.
- NASA. NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products. Disponível em: <<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>> Acessado em 09 de out. de 2023.
- NASA. U.S Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> Acessado 09 de out. de 2023.
- NEWSON, M. **Land, Water, and Development: Sustainable Management of River Basin Systems**. London: Routledge, 1992. 351p.
- NOVAES PINTO, M. Caracterização morfológica do curso superior do rio São Bartolomeu Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geomorfologia, Uberlândia**, v. 48, n. 4, p. 377-397, 1986a.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. **Gestão de bacias hidrográficas**. Estudos Avançados, v. 22, p. 43–60, 2008.

PRINA, Bruno Zucuni; TRENTIN, Romario. GMC: Geração de Matriz de Confusão a partir de uma classificação digital de imagem do ArcGIS®. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto—SBSR**, p. 137, 2015.

RUSLI, N.; MAJID, M,R; DIN, A, H, M. Google Earth-Derived Digital Elevation Model: A Comparative Assessment against ASTER and SRTM Data. **8th International Symposium of the Digital Earth**, 2014.

SANO, S. M. et al. (EDS.). Cerrado: ecologia e flora. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2008.

SENA-SOUZA, J. P. Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu, escala 1:100.000. **Embrapa Cerrados**, 2015.

SILVA, B, S. NOVAES JR., R. A. DIAGNÓSTICO SÓCIO-AMBIENTAL DA MICRO BACIA QUIRIRIM – PURUBA, MUNICÍPIO DE UBATUBA-SP. 2012.

SOUSA, W. B. D. **Física das radiações**: uma proposta para o Ensino Médio. Mestrado em Ensino de Física—São Paulo: Universidade de São Paulo, 14 ago. 2009.

SOUZA, M.; RAMOS, A. P. M.; MARCATO, J. Analysis of the Altimetric Accuracy of ALOS AW3D30 Digital Surface Model for Mato Grosso do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 3, p. 333–338, 30 set. 2019.

Steffen, C. A, INPE. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Disponível em: < <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm> > Acessado em 24 de ago. 2023.

TREUHAFT, R.; CHAPMAN, B.; DUTRA, L. Estimating 3-Dimensional Structure of Tropical Forests from Radar Interferometry. **Ambiência - Revista do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais** V. 2 Edição Especial 1, v. 2, 2006.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

VICTOR, J.; GOMES, P.; BARROS, R. A importância das Ottobacias para gestão de recursos hídricos. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.1287