



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



SRTM: Para uma melhor Utilização - Conhecendo um pouco mais da qualidade planialtimétrica, da influência da resolução espacial e dos modelos de superfície equipotenciais de referência.

Francisco Cristiano Orlando¹, Edilson de Souza Bias², Abimael Cereda Junior³

¹ Engº Cartógrafo, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), SDS Bloco H, Ed. Venâncio II sala 206, 70393-900, Brasília, DF, Brasil. francisco.orlando@ibge.gov.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6664-7902>.

² Professor Associado, Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências – IG, Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC - Ala Central, 70919-970, Brasília, DF, Brasil. edbias@unb.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-0476>.

³ Consultor em inteligência geográfica, Empresa Geografia das coisas, São José dos Campos, SP, Brasil. ceredajunior@geografiadascoisas.com.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-7684>.

Artigo recebido em 29/06/2021 e aceito em 26/03/2022

RESUMO

Mundialmente, o uso de modelos de terreno a partir de um tratamento matemático sobre dados disponibilizados gratuitamente é uma constante, como são os casos dos dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Alos World 3D (AW3D), Global Digital Elevation Model (GDEM), entre outros, sem conhecer a verdadeira qualidade altimétrica e planimétrica dos dados. A maior parte dos usuários desprezam a avaliação planimétrica e focam apenas no refinamento da componente altimétrica, desconsiderando que o erro da componente planimétrica interfere diretamente na qualidade altimétrica do modelo. Desta forma, o objetivo deste estudo é fazer uma avaliação planimétrica do SRTM, além da avaliação altimétrica do mesmo para todo o território brasileiro. Diversos estudos avaliaram o SRTM, utilizando pontos de referência sem uma cobertura de todo o território brasileiro, aplicando simplesmente metodologias de expansão dos resultados obtidos para outras áreas, enquanto no presente estudo utilizou-se pontos de referência distribuídos por todo o território brasileiro, obtidos por satélite, Ice Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat). Este estudo tem como finalidade, além da avaliação da qualidade do SRTM, avaliar a influência da discrepância entre as superfícies de referência dos dados (MapGeo2015 para os pontos de controle X EGM96 para o SRTM). Tem-se a ideia que a qualidade do modelo está ligado diretamente ao tamanho do pixel, sendo que os resultados deste estudo mostram que a melhora da qualidade do MDE não é proporcional à melhora da resolução espacial do dado, mostra também, que a superfície EGM96 é satisfatória para escalas de 1/50.000 ou menores.

Palavras-chave: Modelos Matemáticos, ICESat, Qualidade de dados geoespaciais.

SRTM: For a better user – knowing a little more about planialtimetric quality, the influence of spatial resolution and reference equipotential surface models

ABSTRACT

Worldwide, the use of terrain models based on a mathematical treatment of freely available data is a constant, as in the case of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data, Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Alos World 3D (AW3D), Global Digital Elevation Model (GDEM), among others, without knowing the true altimetric and planimetric quality of the data. Most users despise the planimetric evaluation and focus only on the refinement of the altimetric component, ignoring that the error of the planimetric component directly interferes with the altimetric quality of the model. Thus, the objective of this study is to carry out a planimetric evaluation of the SRTM, in addition to its altimetric evaluation for the entire Brazilian territory. Several studies have evaluated the SRTM, using reference points without coverage of the entire Brazilian territory, simply applying methodologies to expand the results obtained to other areas, while in the present study reference points distributed throughout the Brazilian territory were used, obtained by satellite, Ice Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat). This study aims, in addition to evaluating the quality of the SRTM, to assess the influence of the discrepancy between the reference surfaces of the data (MapGeo2015 for control points X EGM96 for the SRTM). There is the idea that the quality of the model is directly linked to the pixel size, and the results of this study show

that the improvement in the quality of the MDE is not proportional to the improvement in the spatial resolution of the data, it also shows that the EGM96 surface it is satisfactory for scales of 1/50,000 or less.

Key-words: Mathematical Models, ICESat, Geospatial data quality.

Introdução

O SRTM foi obtido no ano de 2000 pelo sensor SIR-C/X-SAR., por meio da interferometria SAR, em bandas com pequenos comprimento de ondas (bandas X e C), gerando um modelo digital de elevação com resolução de 30 metros, porém, a NASA só disponibilizava esta resolução para os Estados Unidos e o referido modelo depreciado para 3 segundos de arco, aproximadamente 90 metros, para outras localidades. A área de cobertura do SRTM compreende às latitudes de 60° N até 56° S. Desde novembro de 2013, o SRTM está sendo disponibilizado pela NASA com resolução espacial de 30 metros para todas as localidades. (NASA, 2019).

Diversos estudos já foram desenvolvidos sobre a qualidade do SRTM analisando: acuraria posicional de redes de drenagem (Tolentino et al, 2017), avaliação vertical de Modelos Digital de Elevação (Miceli et al, (2011); Bias et al, (2011); Lousada e Fernandes (2017); Moraes et al, (2017); Marini et al, (2017); Pham (2018); Orlandi et al, (2019); Machado et al, (2019); Santos, et al, (2020); Ariza-López, e Reinoso-Gordo (2021).

Comparações da precisão horizontal de MDE gerados com SRTM, ASTER, ALOS, TanDEX, podem ser observadas em: Grohmann (2018). Aplicações para análises de inundação e outros impactos, utilizando diversos MDE foram analisados por: Zhang et al. (2019); Zhao et al. (2021).

Existem diversos estudos sobre a avaliação da qualidade do SRTM, como é o caso de Gaboardi, Santos e Oliveira (2005), onde concluíram que o SRTM atende a escala de 1/100.000 em áreas planas, como também o realizado por Orlandi (2016), que demonstrou resultados semelhantes para a avaliação do SRTM em outras áreas no território brasileiro, porém, não utilizaram dados de campo distribuídos por todo o território brasileiro, o que nos leva ao desconhecimento da real acurácia e da compatibilidade de escala do SRTM ao longo de todo o território brasileiro, e isso faz com que o mesmo seja utilizado algumas vezes de forma indevida ou até mesmo, deixe de ser utilizado em situações que, dependendo do caso, atenderia adequadamente.

Satge et al. (2016) ao avaliar diversos MDEs no planalto Andino da América do Sul em diferentes classes de relevo, assim como o potencial destes para aplicações hidrológicas na região, concluíram que o SRTM é mais preciso que o

ASTER GDEM v2, este resultado corrobora com os resultados encontrados por Nakahori (2010), Moura, Bias e Brites (2014), Celestino e Philips (2015).

Segundo os estudos de Höhle e Pedersen (2010) e Mozas, Ureña e Pérez (2013), são em áreas com relevo movimentado que ocorrem as maiores distorções tanto na planimetria quanto na altimetria de um MDE.

De acordo com Basilio do Nascimento e Castro de Oliveira (2020), ao avaliar o SRTM comparando com dados Lidar de maior exatidão, concluíram que as maiores discrepâncias entre tais superfícies encontram-se em locais de maiores altitudes e declividades, corroborando com os resultados encontrados nos estudos de Höhle e Pedersen (2010) e Mozas, Ureña e Pérez (2013).

Além destes, outros modelos são bem estudados, como é o caso do AW3D Standard, que é o melhor DEM global do mundo. Mais de 3 milhões de imagens de satélite são usadas para criar as imagens 3D digitais de alta resolução mais abrangentes disponíveis atualmente. O padrão AW3D é baseado em dados PRISM adquiridos pelo Advanced Land Observing Satellite (ALOS) da Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). O desenvolvimento do padrão AW3D começou em fevereiro de 2014 e é o resultado de um projeto de parceria público-privada entre JAXA, NTT Data e Centro de Tecnologia de Sensoriamento Remoto do Japão (RESTEC).

Outra forma de obtenção de um MDE é a partir de dados laser. O LIDAR (Light Detection and Ranging) é um sensor remoto ativo a bordo de plataformas (tripuladas ou não) e um método direto de captura de dados, o mesmo possui sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser, onde são emitidos feixes de luz na banda do infravermelho próximo favorecendo a modelagem da superfície do terreno, como é o dado do ICESat, que é o satélite da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), destinado a medir a massa de gelo, bem como características da topografia e da vegetação terrestre, lançado em 12 de janeiro de 2003, com o objetivo de medir as elevações das placas de gelo e suas variações ao longo do tempo, além de ter objetivos secundários como medir a elevação da superfície da crosta terrestre. (ZWALLY et al., 2002).

De acordo com Schutz et al. (2005), o sistema GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) do ICESat foi o primeiro a realizar

altimetria a Laser, que emite pulso eletromagnético pelo satélite, capturando dados de elevação junto com seu registro digital.

Todo MDE, por melhor que seja a precisão altimétrica, deve ser preciso também na sua posição planimétrica, de modo que o erro planimétrico não interfira de forma direta na qualidade altimétrica., Alguns estudos indicam formas diferentes de avaliar a acurácia posicional de um MDE, como é o caso do estudo de Vosselman (2008), o qual afirma que um método de avaliar MDE é comparando as distâncias entre as quinas de telhados com os dados dos MDEs, Contudo, Ferreira et al. (2015) afirmam que um outro método de avaliar MDE é comparando a distância entre quinas das edificações extraídas de dados Lidar com pontos de controle oriundos da fotogrametria digital. Já Reinoso (2011) indica um outro método de avaliar a acurácia posicional planimétrica de um MDE comparando curvas de nível homólogas a partir de outro MDE mais acurado.

Mikhail e Ackermann (1976) e posteriormente Wolf e Ghilani (1997), apresentam acurácia como sendo o grau de proximidade de uma estimativa com o valor verdadeiro, enquanto precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média. Uma medida de acurácia proposta por Gauss, denominada de Erro Quadrático Médio (EQM) foi apresentada por Mikhail e Ackermann (1976) e posteriormente por Wolf e Ghilani (1997).

Para identificar e quantificar os erros que ocorrem em bases cartográficas do território brasileiro, a avaliação deve seguir o disposto no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que trata das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

De acordo com o Decreto 89.817 de 1984, o PEC é um indicador de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a acurácia de trabalhos cartográficos e esta probabilidade corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão ($PEC=1,6449*EP$).

Tendo em vista a necessidade do conhecimento amplo do SRTM, o presente estudo tem como objetivo avaliar a qualidade altimétrica do SRTM ao longo de todo o território brasileiro, bem como a sua acurácia posicional (planimetria), além de comparar e analisar a relação da qualidade de MDEs em função do tamanho do pixel dos mesmos, mensurando as discrepâncias entre as superfícies equipotenciais de referência do SRTM (EGM96) e do Brasil (MAPGeo 2015).

Material e métodos

Materiais

Foram usados os seguintes materiais e produtos: SRTM de 1" de arco com resolução espacial de 30 metros, referenciado altimetricamente à superfície equipotencial EGM 96 (Earth Gravitational Model 1996) e planimetricamente ao elipsoide WGS-84, no sistema de coordenadas geográfica em lat./long. obtido no site: <http://dwtkns.com/srtm30m/>; MDE com 3" de arco com resolução de 90 metros do SRTM, referenciado altimetricamente à superfície equipotencial EGM 96 e planimetricamente ao elipsóide WGS-84 com projeção cartográfica UTM (*Universal Transversa de Mercator*) obtido no site: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>; Imagem SAR do ALOS/PALSAR com resolução de 12,5 metros, referenciado altimetricamente e planimetricamente ao elipsoide WGS-84 no sistema de coordenadas geográficas lat./long. obtido no site: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>; MDE do Estado de Pernambuco gerado por Laser (Lidar), com 1 metro de resolução e referenciado planimetricamente ao elipsoide GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial MapGeo 2015 com projeção cartográfica UTM (*Universal Transversa de Mercator*) obtido no IBGE; Pontos altimétricos obtidos pelo satélite ICESat, cedidos pelo IBGE já convertidos planimetricamente para o GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial do MapGeo 2015; Pontos de controle obtidos por meio de medição de campo baseado em sistema de posicionamento por satélite, obtidos no IBGE, referenciados planimetricamente ao elipsoide GRS-80 (Geodetic Reference System 1980) e altimetricamente referenciado à superfície equipotencial MapGeo 2015, sistema de coordenadas geográficas lat./long; Mapa de classe de relevo do Brasil, no formato matricial referenciado planimetricamente ao elipsoide GRS-80, sistema de coordenadas geográficas lat./long. obtido no site: <https://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Mapa-de-Classe-de-relevo-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>; Dados da rede de drenagem no formato vetorial referente ao mapeamento do Estado do Rio de Janeiro, escala de 1/25.000 obtido no portal do IBGE, referenciado planimetricamente ao elipsoide GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial MapGeo 2015 com projeção cartográfica UTM; Os softwares utilizados neste

estudo foram o Qgis 2.18; ArcGis 10.3; MapGeo 2015, R com R Studio, Geoid Height Calculator.

Métodos

A estrutura metodológica da presente pesquisa é apresentada na Figura 1.

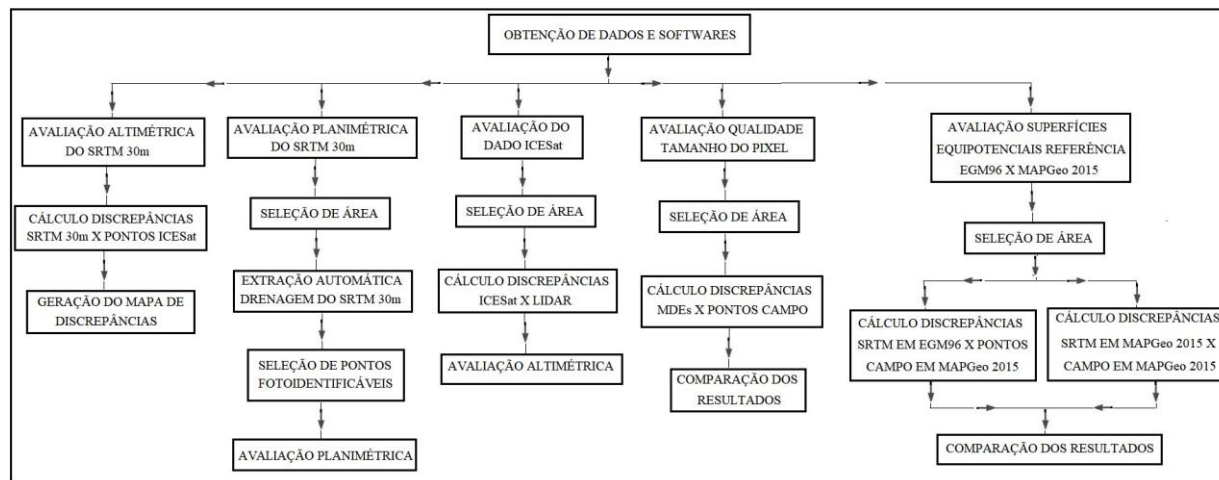


Figura 1– Fluxograma das etapas do estudo

Avaliação altimétrica do SRTM com resolução espacial de 30 metros

Para avaliar a acurácia altimétrica do SRTM ao longo de todo o território brasileiro, foram utilizados como referência os pontos altimétricos obtidos pelo satélite ICESat, em razão da presença destes dados cobrindo todo o território nacional e também por ser um modelo de superfície, assim como é o dado SRTM. Foram utilizados 2.705.927 pontos altimétricos do satélite ICESat, com valores de altitudes referenciadas à superfície equipotencial MAPGeo 2015, disponíveis para todo o território brasileiro.

Visando a elaboração de um mapa contínuo a partir dos valores pontuais das discrepâncias entre as altitudes do SRTM e do ICESat utilizando os 2.7 milhões de pontos altimétricos., As diferenças entre as altitudes foram, interpoladas para todo o território brasileiro, utilizando o software QGis.

A Figura 2 ilustra a distribuição dos pontos altimétricos do satélite ICESat ao longo do território brasileiro, comprovando ser um dado que realmente pode ser utilizado em qualquer parte do território brasileiro, pois existem pontos altimétricos mesmo em áreas hermas como a região amazônica.

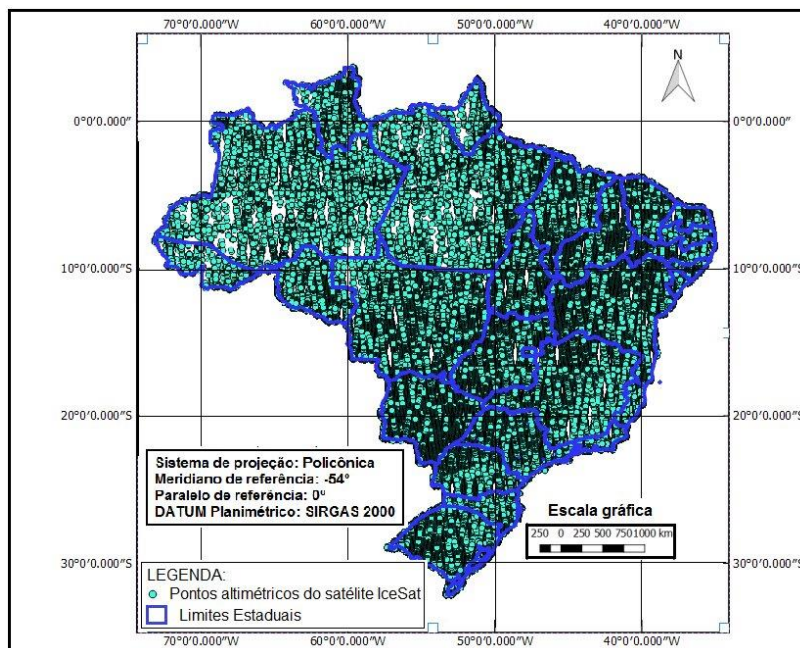


Figura 2 – Distribuição dos pontos altimétricos utilizados do satélite ICESat
Fonte: Mapa de limites estaduais IBGE (2010)

Avaliação da acurácia planimétrica do SRTM

Conforme estudos realizados, por Höhle & Pedersen (2010) e Mozaset al. (2013), as condições de movimentação do relevo e amplitude topográfica são os fatores que mais influenciam na acurácia horizontal de um produto cartográfico, orientando para a necessidade de uma avaliação planimétrica em relevo do tipo montanhoso ou escarpado. Desta forma, área selecionada para a avaliação da qualidade posicional do SRTM foi a região serrana do Estado do Rio de Janeiro, pois esta região apresenta as condições topográficas favoráveis para o presente estudo, ou seja, o relevo montanhoso e escarpado. Desta forma, tomando por base esta região, e em razão dos resultados obtidos, poder-se-á, extrapolar para regiões onde o relevo é mais suave, uma vez que a qualidade da acurácia posicional para os demais tipos de relevo não será inferior à qualidade obtida na referida área selecionada.

Para esta avaliação (planimétrica), optou-se pela metodologia de Vosselman (2008), Ferreira et al. (2015), Reinoso (2011), que indicam a comparação de dados vetoriais do MDE com dados vetoriais de referência.

Definida a área de estudo, os dados foram analisados e posteriormente convertidos para um mesmo sistema de projeção, objetivando compor

um mesmo modelo de projeção. Foi extraída a rede de drenagem a partir do SRTM, de forma automática, utilizando a ferramenta “Hidrology” do software ArcGIS. Em seguida, foram selecionados 20 (vinte) pontos fotoidentificáveis em ambas as redes de drenagem (SRTM e da Carta do IBGE – 1:25.000), para permitir as análises de discrepância, de acordo com a Equação 1.

$$\Delta d_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2} \quad (1)$$

onde ΔE é a diferença entre as coordenadas da componente E, e ΔN é a diferença entre as coordenadas da componente N.

sendo:

$$\Delta E_i = E_{SRTM} - E_{referência}$$

$$\Delta N_i = N_{SRTM} - N_{referência}$$

A Figura 3 ilustra a área selecionada para esta avaliação, assim como a seleção dos pontos fotoidentificáveis para comparação, a área abrange parte do município de Petrópolis e de Teresópolis, contemplando uma área aproximada de 150 km².

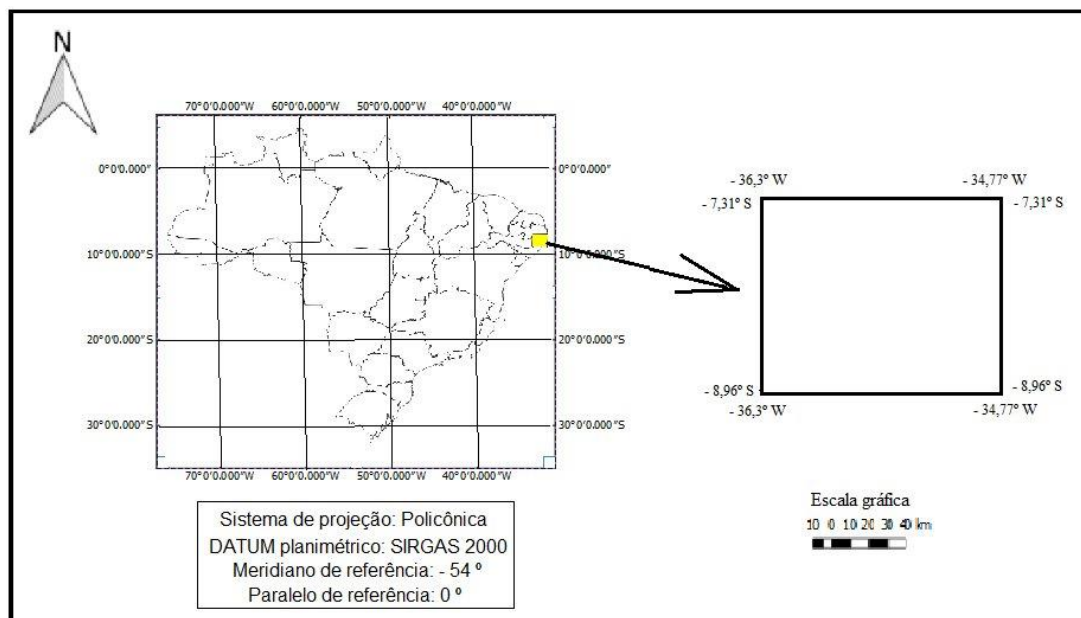


Figura 3 – Área de avaliação planimétrica do SRTM. Fonte: Limite Estadual do Rio de Janeiro elaborado pelo IBGE(2010).

O Quadro 1 apresenta as obtidas da rede de drenagem extraída do SRTM e da carta do IBGE, de acordo com as recomendações da NMAS (National Map Accuracy Standard) publicado em 1999, da

ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) publicado em 2013 e também da NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) publicado em 1998.

Quadro 1 – Registros dos pontos de controle com as coordenadas planimétricas do SRTM e da hidrografia de referência

Código	E_Referência	N_Referência	E_SRTM	N_SRTM
PT01	718131	7533936	718129	7533938
PT02	708279	7537907	708280	7537905
PT03	715177	7524338	715114	7524337
PT04	707019	7527753	707022	7527755
PT05	718357	7530726	718352	7530728
PT06	718390	7536063	718390	7536065
PT07	718910	7524814	718911	7524815
PT08	719329	7530295	719330	7530299
PT09	705903	7530859	705908	7530850
PT10	709362	7535279	709366	7535280
PT11	713826	7535809	713825	7535810
PT12	706135	7536284	706140	7536285
PT13	714710	7538185	714715	7538180
PT14	715871	7534583	715874	7534586
PT15	712666	7531102	712667	7531105
PT16	709936	7531455	709930	7531453
PT17	714500	7528140	714502	7528143
PT18	711484	7532549	711485	7532551
PT19	709097	7525289	709099	7525293
PT20	711769	7526532	711774	7526530

Em seguida, realizou-se o cálculo do valor das discrepâncias por meio da Equação 1 e, posteriormente, por meio da aplicação da Equação 2 calculou-se o valor do EQM e determinou-se o valor do CE90, com a finalidade de identificar e classificar o PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica, referente a acurácia planimétrica do SRTM. Todos os procedimentos foram realizados com a utilização de um script desenvolvido no software “R” e fornecido pelo IBGE para a presente pesquisa.

$$EQM_{plan.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta E^2) + (\sum \Delta N^2)}{n-1}} \quad (2)$$

onde ΔE é a diferença entre as coordenadas da componente E, e ΔN é a diferença entre as

coordenadas da componente N, e n é o número de pontos.

Avaliação do dado altimétrico do satélite ICESat

Com a finalidade de seguir os princípios definidos por Orlando (2020), a avaliação da qualidade altimétrica do ICESat foi realizada, comparando os dados com um MDE gerado por meio de um SRTM, em razão de ambos representarem superfícies contínuas.

Para a avaliação da qualidade altimétrica do dado ICESat, selecionou-se uma área de teste, localizada na parte leste do Estado de Pernambuco (Figura 4), com cerca de 30 mil km², por se possuir para esta área um MDE de alta qualidade, obtido por meio de tecnologia LIDAR, com resolução espacial de 1 m e com acurácia de 10 cm. A área teste, possui um relevo classificado como sendo suave ondulado, compatível com 80% do território brasileiro de acordo com o mapa elaborado pela CPRM (2020).

Para esta avaliação foram considerados todos os 986 pontos altimétricos ICESat disponíveis, e comparados com os valores obtidos

em suas respectivas posições geográficas por meio de LIDAR como verdade de campo.

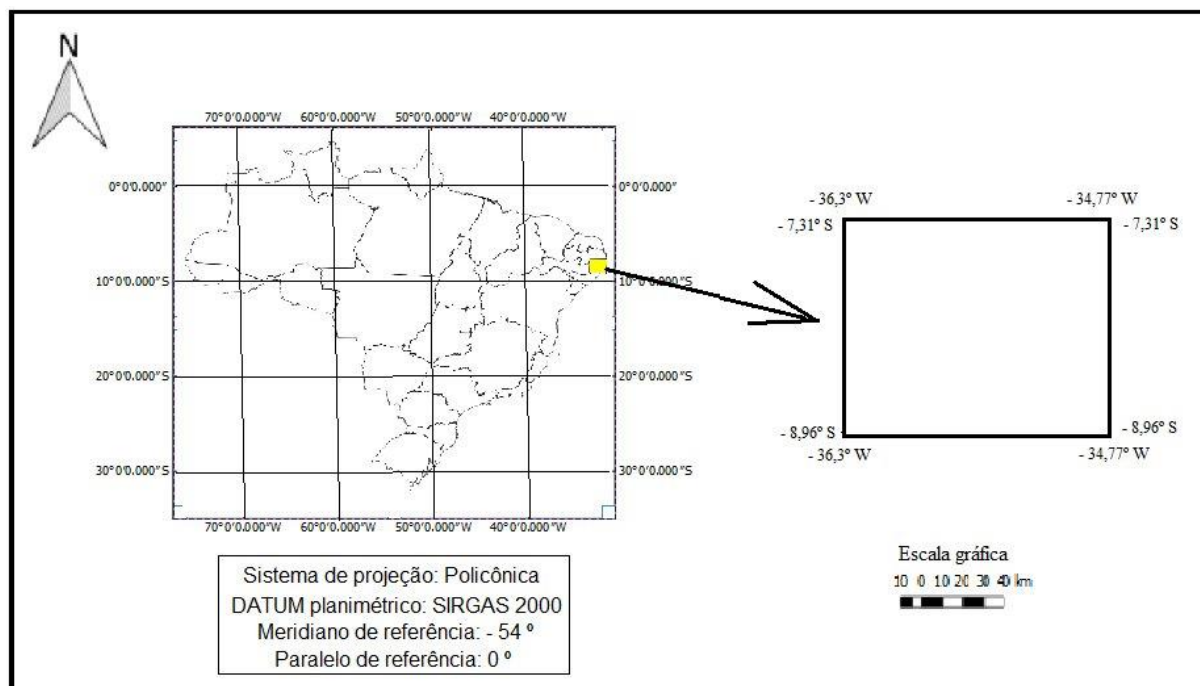


Figura 4 - Área selecionada para avaliação da exatidão dos dados do ICESat
Fonte: Limites Estaduais elaborados pelo IBGE (2010).

O cálculo do EQM ocorreu, após a obtenção das discrepâncias entre os dados ICESat e o MDE Lidar, com a aplicação da Equação 3, e em seguida, foi calculado o PEC altimétrico do dado ICESat.

$$EQM_{alt.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta H^2)}{N-1}} \quad (3)$$

onde N é o número de pontos e ΔH é a diferença de altitude

2.2.4 Avaliação da qualidade de MDE em função da resolução espacial

Com a finalidade de apresentar a relação existente entre o tamanho do pixel e a qualidade do MDE, foram analisados os MDE gerados pelo SRTM (30 e 90 metros) e do ALOS PALSAR (12,5 metros), bem como relacionando os referidos MDEs

as classes de relevo encontradas no Brasil. Para tanto, foram selecionadas 6 (seis) áreas piloto a partir das classes de relevo estabelecidas pela CPRM (2020): Plana, Suave-Ondulado, Ondulado, Forte-Ondulado, Montanhoso e Escarpado.

As áreas do Rio Grande do Sul encontram-se na serra gaúcha e a do Estado do Rio de Janeiro envolvendo a serra de Petrópolis, Teresópolis e Silva Jardim.

Foram utilizados como referência (verdade de campo), pontos de controle obtidos em campo pelo IBGE e processados pelo método PPP – Posicionamento por Ponto Preciso e, cedidos para a presente pesquisa.

Para cada área piloto selecionada, com base nas classes de relevo, foram utilizados todos os pontos de controle disponíveis no IBGE, distribuídos conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Localização das áreas testes

Estado(s)	Região	Extensão (km ²)	Tipo de Relevo	GCP
Mato Grosso do Sul	Norte	50.000	Plano	309
Acre	Leste	16.000	Suave Ondulado	102
Distrito Federal/Goiás	Noroeste	2.000	Ondulado	58
Espírito Santo/Minas Gerais	Sul	6.000	Ondulado	248
Rio Grande do Sul	Centro-leste	9.000	Montanhoso	222
Rio de Janeiro	Central	4.000	Escarpado	511

Para cada conjunto de pontos de controle, selecionados em suas respectivas áreas de teste, foram calculadas as discrepâncias, em seguida os respectivos valores do EQM e então foi realizado uma comparação entre os resultados obtidos nesta análise.

Avaliação de superfícies equipotenciais de referência (EGM96 x MAPGeo2015)

Para esta avaliação, foram utilizadas as mesmas áreas de teste selecionadas na etapa de avaliação de MDE em função do tamanho do pixel, assim como os mesmos pontos de controle e as mesmas quantidades.

Inicialmente fez-se o cálculo das discrepâncias entre os valores de altitude do SRTM com os valores das altitudes dos pontos de referência (verdade de campo), e posteriormente determinado o valor do EQM, para cada uma das 6 áreas selecionadas, sem converter os dados do SRTM da referência equipotencial global (EGM96) para a referência equipotencial oficial do Brasil (MAPGeo 2015). Com isso, obteve-se os valores de discrepâncias e do EQM do SRTM ainda referenciado à superfície equipotencial Global (EGM96) para cada uma das 6 áreas de teste avaliada no presente estudo.

Em seguida, foram convertidos os valores de altitude do SRTM para a superfície equipotencial oficial do Brasil (MAPGeo 2015), para em seguida se realizar um novo cálculo de discrepâncias e do EQM dos dados SRTM já convertidos de (EGM 96) para o (MAPGeo 2015). Com isso obteve-se os valores de discrepâncias e do EQM do SRTM já

referenciado à superfície equipotencial oficial do Brasil (MAPGeo 2015) para cada uma das 6 áreas de teste avaliada no presente estudo.

Com os 2 valores de EQM, fez-se a comparação e analisando os resultados e analisando para uma sinalização da necessidade ou não de conversão dos dados SRTM que estão originalmente em EGM96 para o MAPGeo 2015 antes de utilizá-lo.

Resultados e discussão

Qualidade altimétrica do SRTM

Conforme pode-se observar nos artigos citados na introdução, a grande produção de artigos procuram avaliar a acurácia vertical, ocorrendo quase que um desprezo pela análise da acurácia horizontal, foco do presente estudo, e não permitindo uma avaliação mais abrangente com outros estudos.

A Figura 5 apresenta o mapa coroplético ilustrando as discrepâncias altimétrica do SRTM ao longo de todo o território brasileiro em função dos limites do PEC, considerando como verdade de campo (referência) os dados altimétricos do satélite ICESat.

Nota-se na Figura 5, que a qualidade do SRTM não é uniforme, varia ao longo do território, porém, existem pontos de concentrações onde estão as melhores precisões, por exemplo no litoral do nordeste e do sul, demonstrando que o relevo acidentado do litoral da região sudeste tenha interferido para que a precisão não tenha sido equivalente com os demais litorais.

Existem áreas onde o SRTM possui as mesmas faixas de qualidade, como no nordeste da

Bahia e todo o Estado de Alagoas; também no sudoeste do Estado do Mato Grosso do Sul, no pantanal Mato-Grossense e no norte do Estado do Tocantins; entre outras. Estas semelhanças nos

resultados estão relacionados diretamente as características do terreno, seja em função da classe de relevo.

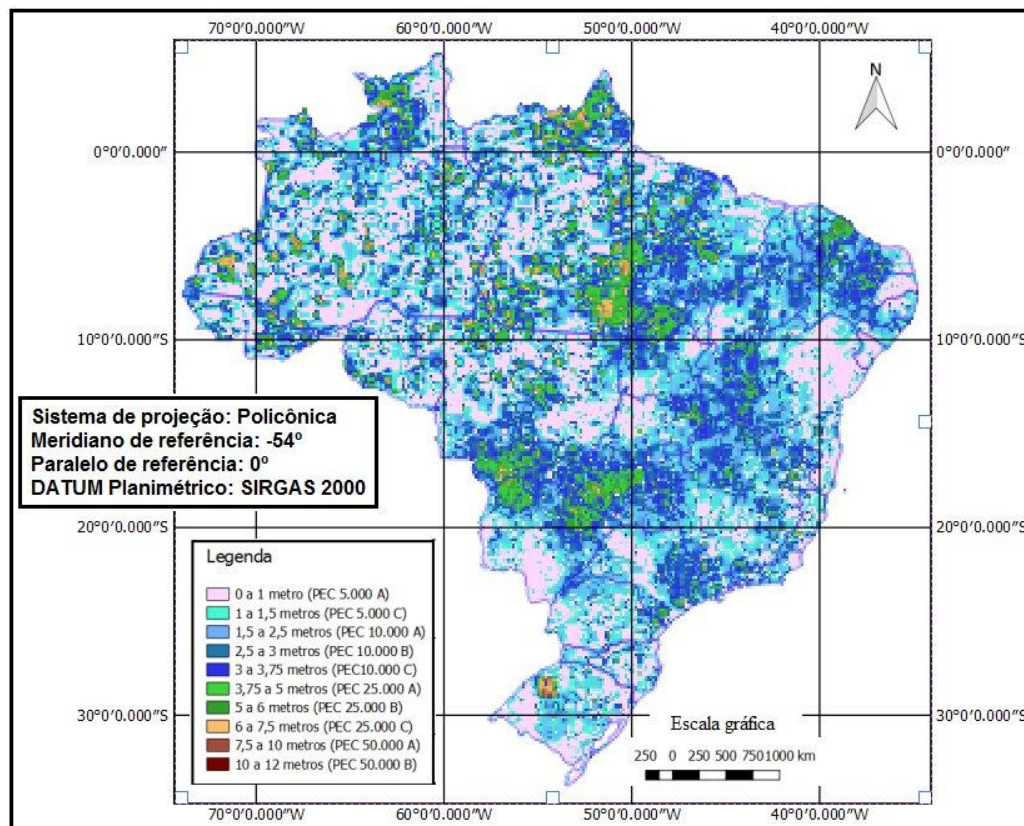


Figura 5– Mapa de discrepâncias do SRTM

Comparando o mapa de discrepâncias do SRTM encontrado no presente estudo com o mapa encontrado em Orlando & Bias (2020), existem diferenças significativas em algumas partes do território, principalmente nas áreas de maior classe de relevo, em razão da diferença de metodologia e de objetivos. No presente estudo utilizou-se como referência dados os dados do ICESat para todo o território brasileiro, no estudo de Orlando e Bias (2020) aplicou a metodologia em áreas piloto, também separando por classes de relevo, com o uso de GCP – Ground Control Point, obtidos em campo e, dos resultados obtidos, foi efetuada a extrapolando para todo o território brasileiro.

Outra divergência encontrada nos resultados do presente trabalho e os apresentados por Orlando & Bias (2020), foi relacionada à escala dos produtos. No presente estudo, os resultados apontam que o SRTM, é compatível com a escala de 1/50.000 classe B ou melhor, dependendo da área, enquanto que o resultado do estudo de Orlando & Bias (2020) a escala encontrada foi 1/100.000 classe A ou melhor.

Pode-se inferir que as diferenças estão diretamente relacionadas com a metodologia do presente trabalhos que utilizou uma base contínua ICESat para efetuar a comparação.

Os resultados encontrados no presente estudo seguem na mesma direção dos resultados encontrados nos estudos de Basílio do Nascimento e Castro de Oliveira (2020) quando é indicado que as maiores discrepâncias do SRTM encontram-se em áreas de maiores declividades.

Qualidade planimétrica do SRTM

O Quadro 3 apresenta os valores estatísticos da avaliação planimétrica dos dados SRTM, o cálculo do EQM, a determinação do CE90 e a devida classificação do PEC, tendo como referência o mapeamento na escala de 1/25.000.

Ainda em relação ao Quadro 3, este apresenta os resultados da avaliação planimétrica dos dados SRTM, onde o menor erro encontrado foi de 1,41 m e o maior erro com 10,3 m, cujo valor de desvio padrão encontrado é de 4,72 m, indicando a compatibilidade com o PEC convencional na classe C (1/25.000) ou classe A (1/50.000).

Quadro 3 – Avaliação planimétrica do SRTM

Resultados estatísticos da análise das discrepâncias	
Média	4,11m
Mínimo	1,41m
Máximo	10,30m
Mediana	3,86m
EQM	4,72m
CE 90	6,33m
PEC	1/25.000 classe C

O resultado apresentado não levou em consideração a influência do erro posicional que pode ocorrer na altitude do ponto, haja vista que os dados obtidos por meio de sistemas GNSS de dupla frequência chegaram a precisão centimétrica, enquanto que o pixel analisado do SRTM na presente pesquisa é de 30 m.

Comparando os resultados encontrados no presente estudo com outros estudos, como por exemplo o estudo de Santos et al. (2016), diverge do presente estudo que indica a aplicação do PEC 1/25.000 classe C ou 1/50.000 classe A, enquanto que o estudo de Santos et al. (2016) indica o PEC compatível apenas com a escala 1/100.000 classe B. Outro aspecto a ser analisado nos resultados de

Santos et al. (2016) e do presente estudos diz respeito as metodologias aplicadas. O presente estudo comparou as redes de drenagem extraídas automaticamente do SRTM com as redes de drenagem do mapeamento sistemático brasileiro na escala de 1/25.000. Santos et al. (2016) comparou curvas de nível gerado do SRTM com curva de nível obtidas com dados pós-processado de GNSS obtidos em campo.

Qualidade do dado altimétrico do satélite ICESat

A avaliação da qualidade dos dados altimétricos do satélite ICESat é apresentada no Quadro 4

Quadro 4 - Avaliação dos dados altimétricos oriundos do satélite ICESat

Resultados estatísticos da análise dos dados ICESat	
EQM	2,16m
LE 90	3,97m
Máximo	4,77m
Mínimo	-6,34m
Média	-0,59m
Mediana	-0,01m
PEC	1/25.000 classe A

Os resultados mostram que a qualidade dos dados altimétricos do satélite ICESat são compatíveis com a escala de 1/25.000 PEC A, indicando a possibilidade do uso desses dados para avaliar modelos de média e pequena escala, como o SRTM por exemplo.

Ainda referente ao Quadro 4, este apresenta também, que o LE90 é inferior a 4 metros e que o EQM é de 2,16 metros indicando que os dados altimétricos oriundos do satélite ICESat tem grande

potencialidade para validação de MDEs em função da qualidade e densidade ao longo do território brasileiro.

Comparando os resultados do presente estudo com os encontrados em outros trabalhos que analisaram a qualidade do dado altimétrico ICESat, como é o caso de Passaia (2016), identifica-se divergência na questão da acurácia altimétrica, pois no presente estudo, (Quadro 4) o valor de EQM apresentado é de 2,16 metros, enquanto que o valor

do EQM apresentado pelo estudo de Passaia (2016) é de 30 cm, essa diferença pode ser em função da metodologia aplicada em ambos estudos. Neste estudo utilizou-se como base de comparação um MDS obtido por LIDAR com 1 metro de resolução espacial em todo o Estado de Pernambuco, com isso tendo todas as influências da topografia e vegetação, enquanto que o estudo de Passaia (2016) utilizou os dados altimétricos de algumas estações fluviométricas estabelecidas pela ANA (Agência Nacional de Águas), ou seja, o modelo gerado por

Passaia (2016) era um MDT – Modelo Digital do Terreno. Outro fato pode ter influenciado no resultado é a extensão da área trabalhada. Passaia (2016) avaliou apenas sobre o Rio Madeira, enquanto que no presente estudo a área foi todo o Estado de Pernambuco.

Influência da resolução espacial na qualidade dos modelos de elevação de terreno

O Quadro 5 apresenta os valores do EQM dos diversos MDEs gerados com os pixels de 12,5 m 30 m e 90 m.

Quadro 5 – Comparação do EQM nos diversos tipos de classe de relevo, utilizando o SRTM e o ALOS.

Classes de Relevo	Valores do EQM para diferentes resoluções do MDE		
	SRTM 90	SRTM 30	ALOS 12,5
Plano	6,10m	4,78m	4,53m
Suave Ondulado	11,67m	4,99m	4,67m
Ondulado	16,74m	5,27m	5,29m
Forte Ondulado	18,42m	6,18m	6,43m
Montanhoso	22,29m	8,22m	7,94m
Escarpado	35,05m	14,18m	14,16m

A Figura 6 ilustra as diferenças dos valores do EQM encontradas na avaliação dos diversos

MDEs com diferentes tamanhos de pixels em suas diversas classes de relevo.

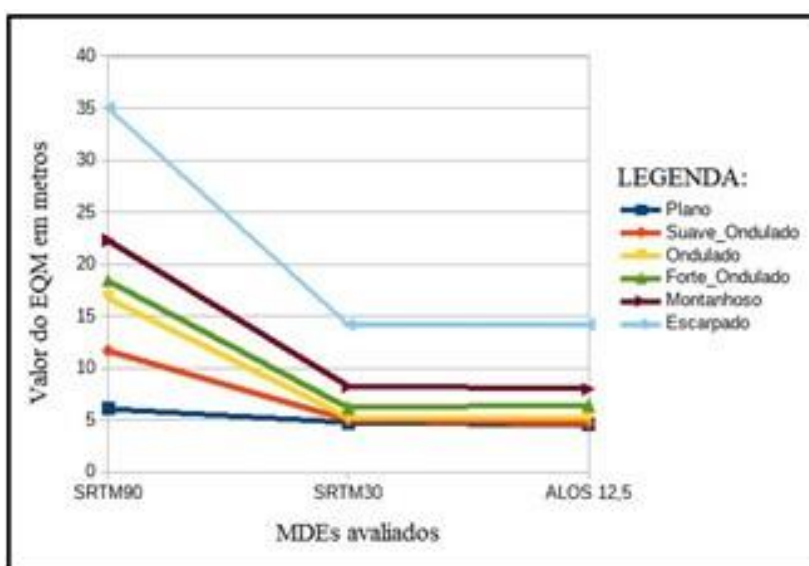


Figura 6 – Valores do EQM analisado em suas diversas configurações de classe de relevo para tamanhos de pixels diferentes

Do Quadro 5 e da Figura 6 pode-se observar que as discrepâncias aumentam de acordo com as variações do relevo. Nas áreas planas, as

discrepâncias não sofrem grande influência em função do tamanho do pixel. Para as demais classes de relevo, observa-se que o SRTM 30 e o ALOS

12,5, não apresentam variações significativas, com uma maior discrepância sendo observada no relevo escarpado. Entretanto, como era de se esperar, o SRTM 90 possui as maiores variações.

É notável na Figura 6, para a classe de relevo plana, o valor do EQM varia pouco mais de 1 metro, para os 3 (três) MDE (SRTM 90, 30 e ALOS), o que não ocorreu nas demais classes de relevo. Este resultado justifica-se pelo fato de que, havendo pouca ou nenhuma variação do relevo, a média da altitude no pixel de 90 metros é semelhante a média da altitude do pixel de 12,5 metros.

Uma razão provável para os resultados do EQM serem muito próximos entre o MDE de 30 metros de resolução do SRTM (Banda X) e o MDE de 12,5 metros do ALOS/PALSAR (Banda L), se dá em função de que os pontos de controle utilizados na avaliação dos modelos foram obtidos em sua grande maioria em solo exposto.

Analisando a influência da resolução espacial (Quadro 5 e a Figura 6), observa-se que o MDE ALOS/PALSAR com pixel de 12,5 metros não apresentou melhora considerável em nenhuma das classes de relevo estudadas.

Rao (2004) afirma ter encontrado erros menores de 5 metros na componente vertical do MDE SRTM 90 metros, sendo confirmado com o resultado apresentado no Quadro 5, porém, no estudo de Rao (2004) não há informação acerca da classe de relevo, todavia, esse valor, de acordo com

o Quadro 5, só é possível em terrenos com classes de relevo Plana e Suave-Ondulado.

Observa-se que para os relevos mais íngremes, não foi possível encontrar erros menores que 5 metros, levando a crer que é possível que a diferença encontrada entre este estudo e o estudo de Rao (2004), seja em função de que o MDE SRTM avaliado por Rao (2004).

A precisão estimada a priori pela NASA para o MDE do SRTM de 30 metros de resolução espacial é de 16 metros em 90% dos dados, conforme afirma Rabus et al. (2003), e os resultados apresentados neste estudo, conforme Quadro 5, confirmam esse valor para o MDE SRTM de 1" de arco.

Estes mesmos resultados se assemelham com os obtidos nos estudos de Elkhachy et al. (2018) quando afirmaram que a qualidade do MDE SRTM é bem superior ao estimado pela NASA, pois neste estudo, até mesmo na área com classe de relevo classificada como escarpado, a acurácia do MDE SRTM ficou abaixo de 16 m.

3.5 Comparativo entre superfícies equipotenciais de referência (EGM96 X MAPGeo 2015)

O Quadro 6 apresenta os valores máximo e mínimo, para cada classe de relevo, obtidas das discrepâncias do MDE SRTM de 30 metros sem a conversão do EGM 96 para o MapGeo 2015, e as discrepâncias do mesmo MDE após a referida conversão para o MAPGeo 2015.

Quadro 6 - Discrepâncias máximas e mínimas entre a superfície equipotencial EGM96 comparado com a superfície equipotencial oficial do Brasil, o MapGeo 2015.

Classes de Relevo	Valores de discrepâncias	
	Máximo	Mínimo
Plano	1,78m	-1,97m
Suave Ondulado	0,45m	-1,05m
Ondulado	0,82m	-0,11m
Forte Ondulado	1,69m	0,31m
Montanhoso	0,76m	-0,57m
Escarpado	0,56m	-1,7m

Nota-se pelo Quadro 6, que o tipo de classe de relevo não tem uma relação direta no resultado da conversão do EGM 96 para o MapGeo 2015, ou seja, não existe um padrão no comportamento das discrepâncias entre as superfícies equipotenciais analisadas em função da classe de relevo do terreno.

Esta discrepância pode estar associada a erros aleatórios existentes tanto no EGM 96 como no MapGeo 2015 gerados, por exemplo pela falta de dados no local e obtidos por interpolação, mas que esta análise de identificação dos motivos das

discrepâncias encontradas entre os respectivos modelos não faz parte dos objetivos deste estudo.

Os maiores valores de discrepâncias encontradas para as áreas avaliadas neste estudo foram apresentadas na área plana, contudo, isso não significa que o mesmo resultado se repetirá em outras áreas com a mesma classificação de classe de relevo, pois estes resultados indicam que estas discrepâncias estão associadas diretamente com a qualidade dos modelos avaliados (EGM 96 e MapGeo 2015), onde a qualidade do modelo

depende diretamente dos dados utilizados quanto à precisão, quantidade e distribuição dos mesmos nas elaborações dos mesmos, e não em função do tipo de terreno.

O Quadro 7, apresenta os valores do Erro Quadrático Médio (EQM) dos SRTM de 1" de arco e de 3" de arco, em diversas classes de relevo, referenciadas nas duas superfícies equipotenciais, em EGM 96 (dado original) e em MapGeo 2015 (convertido para a superfície oficial do Brasil):

Quadro 7 – Valores do EQM referenciadas às superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MapGeo 2015, em diversos tipos de classe de relevo.

Classes de relevo	Valores do EQM em diferentes resoluções do SRTM			
	SRTM30		SRTM90	
	EGM96	MAPGeo 2015	EGM96	MAPGeo 2015
Plano	4,78m	4,58m	6,10m	5,40m
Suave Ondulado	4,99m	4,88m	11,67m	11,42m
Ondulado	5,27m	4,98m	16,74m	16,03m
Forte Ondulado	6,18m	5,67m	18,42m	18,02m
Montanhoso	8,22m	7,59m	22,29m	21,93m
Escarpado	14,18m	14,01m	35,05m	34,36m

O Quadro 7, indica que os valores do EQM dos MDEs avaliados, são bastante pequenas (alguns centímetros), apesar das diferenças entre as duas superfícies equipotenciais, indicando que dependendo da escala do produto cartográfico, a conversão do EGM 96 para o MapGeo 2015, e que não existe influência da classe de relevo.

Os resultados do presente estudo estão semelhantes aos resultados encontrados em outros estudos, como é o caso de Silva (2002), também os estudos de Arana (2001), onde também encontraram discrepâncias entre o modelo de superfície equipotencial global (EGM96) e a superfície equipotencial oficial do Brasil (MapGeo 2015) menores de 1 metro, mesmo utilizando áreas e

também pontos de referência diferentes de avaliação do presente estudo.

Conclusões

Os resultados encontrados, baseados nas diferentes análises, vieram comprovar a variação existente do SRTM em função da classe de relevo do terreno, obtendo menor qualidade em áreas mais acidentadas, e que a qualidade altimétrica do MDE SRTM de 30 metros de resolução espacial é compatível com a escala de 1/50.000 classe A para o Brasil, visto que mais de 90% dos dados possuem discrepâncias inferiores a 10 metros.

O presente estudo indica que a qualidade posicional do SRTM é compatível com a classificação do PEC para a escala de 1/25.000 classe A. Os

resultados indicam também que a componente altimétrica do SRTM é compatível com a escala de 1/50.000 para o Brasil, variando ao longo do território. É possível afirmar também, de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, que é possível o uso regionalizado do SRTM para fins cartográficos até a escala de 1/25.000 e sendo assim, o erro planimétrico do SRTM não está prejudicando a qualidade da informação altimétrica do mesmo, pois a qualidade planimétrica é semelhante à altimétrica na maior parte do Brasil e mais acurado em pequenas áreas ao longo do território brasileiro.

Conclui-se com as análises que os dados altimétricos do satélite ICESat tem de grandes potencialidades no seu uso, principalmente para avaliação de modelos de superfícies, como é o caso do SRTM, entre outros. A acurácia destes dados nos permite concluir que para áreas onde tem uma grande densidade de dados é possível não só avaliar modelos como também gerar modelos locais com boa qualidade, compatível com a escala de 1/25.000 classe A.

Os resultados obtidos no presente estudo apresentaram que a qualidade do ALOS/PALSAR de 12,5 metros de resolução possui pouca ou nenhuma melhoria em relação à qualidade do SRTM de 30 metros de resolução, pois na avaliação do PEC de ambos modelos, em diversas áreas com classes de relevos variadas, os resultados foram semelhantes, indicando que a influência do tamanho do pixel tem sua limitação na qualidade de um MDE, que outros fatores, como o método de aquisição do mesmo, também interferem na qualidade. É possível afirmar que existe um limite, no quesito qualidade do MDE, para o tamanho do pixel e que o método de aquisição tem maior influência na qualidade do que a própria resolução espacial do modelo.

Foi possível demonstrar neste estudo, que se tratando de médias e pequenas escalas (mapeamento sistemático brasileiro nas escalas de 1/25.000 e menores), é totalmente dispensável a conversão do SRTM que está referenciada à superfície equipotencial global EGM 96 para a superfície equipotencial oficial do Brasil, MapGeo 2015, pois o modelo geopotencial global tem qualidade compatível com o MapGeo 2015 para escalas médias e pequenas.

Agradecimentos

Agradecemos ao IBGE por ter cedido os dados ICESat e dados de campo (referência) e por ter disponibilizado o script de análise dos dados.

Referências

- Arana, J. M. 2001. O uso de GPS na elaboração de carta geoidal. São Paulo, UNESP. 20, 73-85.
- Basilio do Nascimento, F. J.; Castro de Oliveira, L. 2020. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação SRTM e LIDAR e suas aplicações em análises morfométricas. Revista Militar De Ciência E Tecnologia, 37, <http://ebrevistas.eb.mil.br/CT/article/view/4419>
- Ariza-Lopes, F. J., Reinoso-Gordo, J. F. 2021. Métodos de orlado para la evaluación de la exactitud altimétrica en modelos digitales de elevaciones del terreno. Revista Cartográfica, 103 p. 33-45
- Bias, E. S.; Ribeiro, R. J. C.; Baptista, G. M. M.; Bernardi, J. V. E. 2011. Avaliação da exatidão do MDE obtido por meio do SRTM e pela carta do IBGE na escala 1:100.00. Revista Brasileira de Cartografia. 63-149-155.
- BRASIL. Decreto Nº 89.817 de 20 de Junho de 1984. Normas Técnicas Da Cartografia Nacional. 1984. Poder Executivo, Brasília, DF, Diário Oficial da União, Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em: ago. 2019.
- Celestino, V. S.; Philips, J. W. 2015. Avaliação altimétrica para projetos de usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro: Revista Brasileira de Cartografia, 67, 507-525.
- Elkhrachy, I. 2018. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. Ain Shams Engineering Journal, 9, 1807-1817
- Ferreira, F. R.; Larocca, A. P. C.; Cintra, J. P. 2015. Segmentação do espaço urbano por meio de dados Lidar aerotransportado. Revista Brasileira de Cartografia. 67, 1413-1420.
- Gaboardi, C.; Santos, A. R. P.; Oliveira, C. L. 2005. Avaliação da Precisão Vertical dos Modelos SRTM para a Amazônia. Revista Brasileira de Cartografia. 15, 1-11.
- Grohmann, C. H. 2018. Evaluatin of TanDEM-X DEMs n selected Brazilian sites: Comparasion with SRTM, ASTER, GDEM and ALOS AW3D30. Remote Sensing of Envirnmnt, 212, 121-133.
- Höhle, J.; Pedersen, C. O. 2010. A New Method for Checking the Planimetric Accuracy of Digital Elevation Models Data Derived by Airborne Laser Scanning. In Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, University of Leicester. Leicester, UK. p. 5.

- Lousada, G.; Fernandes, M. C. 2017. Avaliação da precisão vertical de modelos digitais de elevação e análise de tendência em diferentes domínios geomorfológicos. *Revista Brasileira de Cartografia*. 69, 1265-1276.
- Machado, V. S.; Junior, J. M.; Souza, M. K. G.; Osco, L. P.; Ramos, A. P. M. 2019. Validação da acurácia vertical de modelos digitais de superfície utilizando o banco de dados do Sistema de Gestão Fundiária: Um estudo de caso no oeste do estado de São Paulo. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 42-139-147.
- Marini, L. B.; Junior, J. M.; Ramos, A. P. M.; Filhos, A. C. P.; Barros, W. M.; Higa, L. T. 2017. Análise da acurácia altimétrica dos modelos digitais de superfície SRTM, ASTER e Topodata e aplicação na representação 3D do Pantanal da Nhecolândia. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 40 48-54.
- Micelli, B. S.; Dias, F. M.; Seabra, F. M.; Santos, P. R. A.; Fernandes, M. C. 2011. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. *Revista Brasileira de Cartografia*. 63, 181-201.
- Mikhail, E.; Ackermann, F. 1976. *Observations and Least Squares*. University Press of America. New York. 497.
- Morais, J. D.; Faria, T. S.; Elmiro, M. A. T.; Nero, M. A.; Silva, A. A.; Nobrega, A. A. 2017. Altimetry assessment of ASTER GDEM V2 and SRTM Digital Elevation Models: A case study in urbana área of Belo Horizonte, MG, Brazil. *Boletim de Ciências Geodésicas*. 23, 1-15.
- Moura, L. Z.; Bias, E. S.; Brites, R. 2014. Avaliação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDES) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. *Revista Brasileira de Cartografia*, 66, 1-11
- Mozas, A. T. C.; Ureña, M. A.; Pérez, J. L. 2013. Accuracy of Contour Lines Using 3D Bands. *International Journal of Geographical Information Science*. 27, 2362-2374.
- Nakahori, A. A. G. 2010. Geração e avaliação de ortomagem ALOS/PRISM 1B1: Estudo de caso para São Gabriel, RS. Programa de pós-graduação em sensoriamento remoto, UFRGS, Porto Alegre, dissertação de mestrado. 136.
- Orlandi, A. G. 2016. Avaliação da acurácia do modelo SRTM para o Brasil. Programa de pós-graduação em geografia, Universidade de Brasília, dissertação de mestrado, 54.
- Orlandi, A. G.; Carvalho Júnior, O. A.; Guimarães, R. F.; BIAS, E. S.; Corrêa, D. C.; Gomes, A. T. 2019. Vertical accuracy assessment of the processed SRTM data for the Brazilian Territory. *Boletim de Ciências Geodésicas*. 251-14.
- Orlando, F. C. 2019. Análise da potencialidade do uso de MDE global em trabalho de grande escala ao longo de todo o território brasileiro. Programa de pós-graduação em geociências aplicadas, Universidade de Brasília, dissertação de mestrado, p. 95.
- Orlando, F. C.; Bias, E. S. 2020. Análise da qualidade dos dados SRTM ao longo de todo o território brasileiro. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. 43 340-348.
- Passaia, O. A. 2016. Observação da altimetria do satélite ICESat em cursos d'água para aplicações hidrológicas. Programa de graduação em engenharia civil, UFRGS, trabalho de diplomação, 71.
- Pham, H. T.; Marshall, L.; Johnson, F.; Sharma, A. 2018. A method for combining SRTM DEM and ASTER GDEM2 to improve topography estimation in regions without reference data. *Remote Sensing of Environment*, 210, 229-241.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. 2003. *The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar*. *ISPRS: Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 241-262.
- Reinoso, J. F. An Algorithm for Automatically Computing the Horizontal Shift between Homologous Contours from DTMs. 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 272-286.
- Rao, K. S. Validation of Digital Elevation Model Derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS Field measurements. 2004. Disponível em: <www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm> Acesso: 28 fev 2021.
- Santos, A. de P. dos.; Medeiros, N. das G.; Santos, G. R. dos.; Rodrigues, D. D. 2016. Avaliação da acurácia posicional planimétrica em modelos digitais de superfície com o uso de feições lineares. Curitiba: *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22, 157-174.
- Santos, A. P.; Medeiros, N. G.; Dal Poz, A. P.; Santos, G. R.; Rodrigues, D. D.; Emiliano, P. C. 2020. Methodology for the extration of homologous points from a DEM/DSM to evaluate the relative positional accuracy. *Boletim de Ciências Geodésicas*. 26, 1-14.
- Satge, F.; Denezine, M.; Pillco, R.; Timouk, F.; Pinel, S.; Molina, J.; Bonnet, M. P. 2016. Absolute and relative height-pixel accuracy of SRTM-GL1 over the South American Andean Plateau. *ISPRS*

- journal of photogrammetry and remote sensing. 121, 157-166.
- Schutz, B. E.; Zwally, H. J.; Shuman, C. A.; Hancock, D.; Dimarzio, J. P. 2005. Overview of the ICESat Mission. *Geophysical Research Letters*, 32, 4.
- Silva, M. A. 2002. Obtenção de um modelo geoidal para o Estado de São Paulo. Programa de pós-graduação em engenharia de transporte, Universidade de São Paulo, Dissertação de mestrado, 90.
- Vosselman, G. 2008. Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 3, 99–104.
- Tolentino, F. M.; Silva, C. R.; Santil, F. L. P. 2017. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ArcGIS e QGIS. *Revista Brasileira de Cartografia*. 69 1287-1301
- Waring, R. H.; Way, J.; Hunt, Jr. E. R.; Morrissey, L.; Ranson, K. J.; Weishampel, J. F.; Orem, R.; Franklin, S. E. 1995. Imaging radar for ecosystems studies. *BioScience*. 45, 715-723.
- Wolf, P. R.; Ghilani, C. D. 1997. Adjustment computations: Statistics and least squares in surveying and GIS. *Wiley Series in Surveying and Boudary Control*. New York. 564.
- Zhang, K.; Gann, D.; Ross, M.; Robertson, Q.; Sarmiento, J.; Santana, S.; Rhme, J.; Fritz, C. 2019. Accuracy ASsessment F Aster, SRTM, Alos, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding. *Remote Sensing of Envirnment*, 225, 290-306.
- Zwally, H. J.; Schutz, B.; Abdalati, W.; Abshire, J.; Bentley, C.; Brenner, A.; Bufton, J.; Dezio, J.; Hancock, D.; Harding, D.; Herring, T.; Minster, B.; Quinn, K.; Palm, S.; Spinhirne, J.; Thomas, R. 2002. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journal of Geodynamics*. 34, 405-445.
- Zhao, L.; Zhou, W.; Peng, Y.; Hu, Y.; Ma, T.; Xie, Y.; Wang, L.; Liu, J.; Liu, Z. 2021. A new AG-AGB estimation model based on MODIS and SRTM data in Qinghai Province, China. *Ecological Indicator*, 133, 1-15.