



Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil
Vertical Accuracy and Calibration of Digital Elevation Models (DEMs) for the Piranhas-Assu River Basin, Rio Grande do Norte, Brazil

Paulo Victor do Nascimento Araújo^{1,2}; Venerando Eustáquio Amaro^{1,3};
Alex Vinícius Capistrano Alcoforado³ & André Luis Silva dos Santos⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Caixa Postal 1524, Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal-RN, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) Campus Macau, Rua das Margaridas, 300, Conjunto COHAB, CEP 59500-000, Macau-RN, Brasil

³Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP)(UFRN)

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)

Campus São Luis Monte Castelo, Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP 65030-005, São Luis-MA, Brasil

E-mail: paulo.araujo@ifrn.edu.br; venerando.amaro@gmail.com; alexalcoforado@gmail.com; andresantos@ifma.edu.br

Recebido em: 07/02/2018 Aprovado em: 03/04/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_351_364

Resumo

A crescente demanda em uso de dados altimétricos de alta precisão vertical, para o uso em trabalhos ambientais, vem aumentando de forma significativa nos últimos anos. Entretanto, cuidados especiais devem ser tomados para a utilização desse tipo de produto, principalmente na verificação do seu erro vertical. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade vertical e desenvolver uma metodologia de calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos a partir dos levantamentos realizados pela *Shuttle Radar Topographic Mission* e de sensores aerotransportados *Light Detection And Ranging* na Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, região norte do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Essa avaliação e calibração foi realizada para duas porções dentro da área de estudo: uma regional e outra local. Na área regional foi utilizado apenas o MDE SRTM, enquanto que na área local, foram utilizados os MDEs SRTM e LiDAR aerotransportado. Para calibração foi utilizada uma malha com pontos de controle altimétrico de alta precisão vertical. Os resultados demonstraram que nas áreas de estudo, o MDE SRTM apresentou uma avaliação satisfatória de precisão vertical, melhorada (de 26 a 29%), após sua calibração. Na área local, o uso do MDE LiDAR aerotransportado se mostrou com melhor precisão vertical em comparação ao MDE SRTM, e também foi melhorado (15%) após sua calibração com pontos de controle. Esta pesquisa demonstra a necessidade de avaliação e calibração regional/local do erro vertical de qualquer MDE, antes do seu uso, em trabalhos que necessitem de informações verticais.

Palavras-chaves: Altimetria; GNSS; SRTM; LiDAR Aerotransportado

Abstract

There is a growing need for high resolution altimetry data to use in environmental research in the last years. Therefore, addition criteria must be applied for this data usage, especially due to vertical error. This paper focuses on vertical error evaluation and calibration methodology of Digital Elevation Models (DEM) obtained with Shuttle Radar Topographic Mission and with airborne Light Detection and Ranging in the Piranhas-Açu river basin; north part of Rio Grande do Norte State, Brazil. The evaluation and calibration was conducted in two sectors of the study area: regional and local. The regional sector was evaluated with SRTM data only and the local sector with DEM from SRTM and airborne LiDAR. The calibration used a network of high vertical accuracy altimetric control points data. The results show that the in the study area the SRTM DEM accuracy is satisfactory and was improved by 26-29% after calibration. In the local area, airborne LiDAR is more accurate than SRTM and was also enhanced by control points calibration (15%). This paper demonstrates the need for vertical error analysis and calibration in DEM prior to topographic use.

Keywords: Altimetry; GNSS; SRTM; Airborne LiDAR

1 Introdução

A utilização de modelos digitais de elevação (MDEs) com alta acurácia vertical para subsidiar estudos ambientais, tem aumentado significativamente nos últimos anos, principalmente em estudos com enfoques hidrológicos e modelagem de inundações e enchentes (e.g., Valeriano & Carvalho Júnior, 2003; Pires *et al.*, 2005; Medeiros *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2010; Moura *et al.*, 2014; Ribeiro & Ferreira, 2014; Chen *et al.*, 2017; Petrasova *et al.*, 2017). Entretanto, observa-se uma carência na oferta de modelos com alta acurácia vertical para recortes regionais e locais, principalmente nos modelos disponibilizados gratuitamente. Um dos principais desafios da modelagem hidrológica em detalhe está na caracterização morfométrica e delineamento da rede hidrográfica, e estas necessitam de MDEs com uma elevada precisão vertical (Pires *et al.*, 2005).

A qualidade de um MDE depende do tipo e da magnitude dos erros a ele relacionados. É importante considerar que os erros são inevitáveis, visto que os MDEs são visões simplificadas da realidade, submetidas a um processo de generalização. Os parâmetros modelados são, portanto, inerentemente imprecisos embora sua representação possa realizar-se com mais ou menos exatidão, dependendo do método de coleta de dados utilizados (Chagas *et al.*, 2010); além disso, os modelos são criados, distribuídos e usados muito frequentemente sem qualquer referência à magnitude do erro implícito ou para os métodos aplicados para sua detecção ou correção (Felicísimo, 1994). A acurácia vertical de um MDE e de seus atributos topográficos derivados, dependem diretamente da qualidade e densidade dos dados primários, da estrutura dos dados (matricial ou vetorial), da resolução espacial, da complexidade topográfica da área modelada e dos algoritmos utilizados nas interpolações de modelagens (Thompson *et al.*, 2001). Sobre a complexidade topográfica, os MDEs podem ser influenciados pelas características do terreno e comumente apresentam qualidade superior em áreas de relevo pouco movimentado e declive suave (Jarvis *et al.*, 2004).

Um dos MDEs gratuitos comumente utilizados em pesquisas ambientais no Brasil são os modelos obtidos nos levantamentos realizados pela *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). Os dados de elevação SRTM são derivados do sensor de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) nas bandas C (5,6cm – 5,3GHz) e X (3,1cm

– 9,6GHz) (Gorokhovich & Youtianiouk, 2006; Van Niel *et al.*, 2008). A primeira versão dos dados da missão SRTM foi disponibilizada em 2003 e era fornecida pela *United States Geological Survey*. Inicialmente, para os Estados Unidos os dados foram disponibilizados a uma resolução de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m no equador), mas para o resto do mundo disponibilizaram um segundo produto de 3 arco-segundos (aproximadamente 90m no equador). Em 23 de setembro de 2014, a Casa Branca anunciou que os dados topográficos de alta resolução gerados a partir da missão SRTM, deveriam ser disponibilizados globalmente até o final de 2015 (NASA, 2017). Entretanto, o produto possui um erro médio vertical bastante elevado para a América do Sul. O erro absoluto vertical e o erro relativo vertical médio associado a esse produto, para as cenas localizadas na América do Sul são de 6,20 e 5,50 metros, respectivamente (Rodriguez *et al.*, 2006).

Mesmo assim, para o desenvolvimento de trabalhos a níveis global ou de grandes proporções regionais, a utilização de MDE SRTM se torna extremamente eficaz ou satisfatória. Mas, quando se deseja utilizar o MDE SRTM em pequenas escalas regionais ou locais, o seu erro vertical se evidencia como um grande problema (Correa *et al.*, 2017).

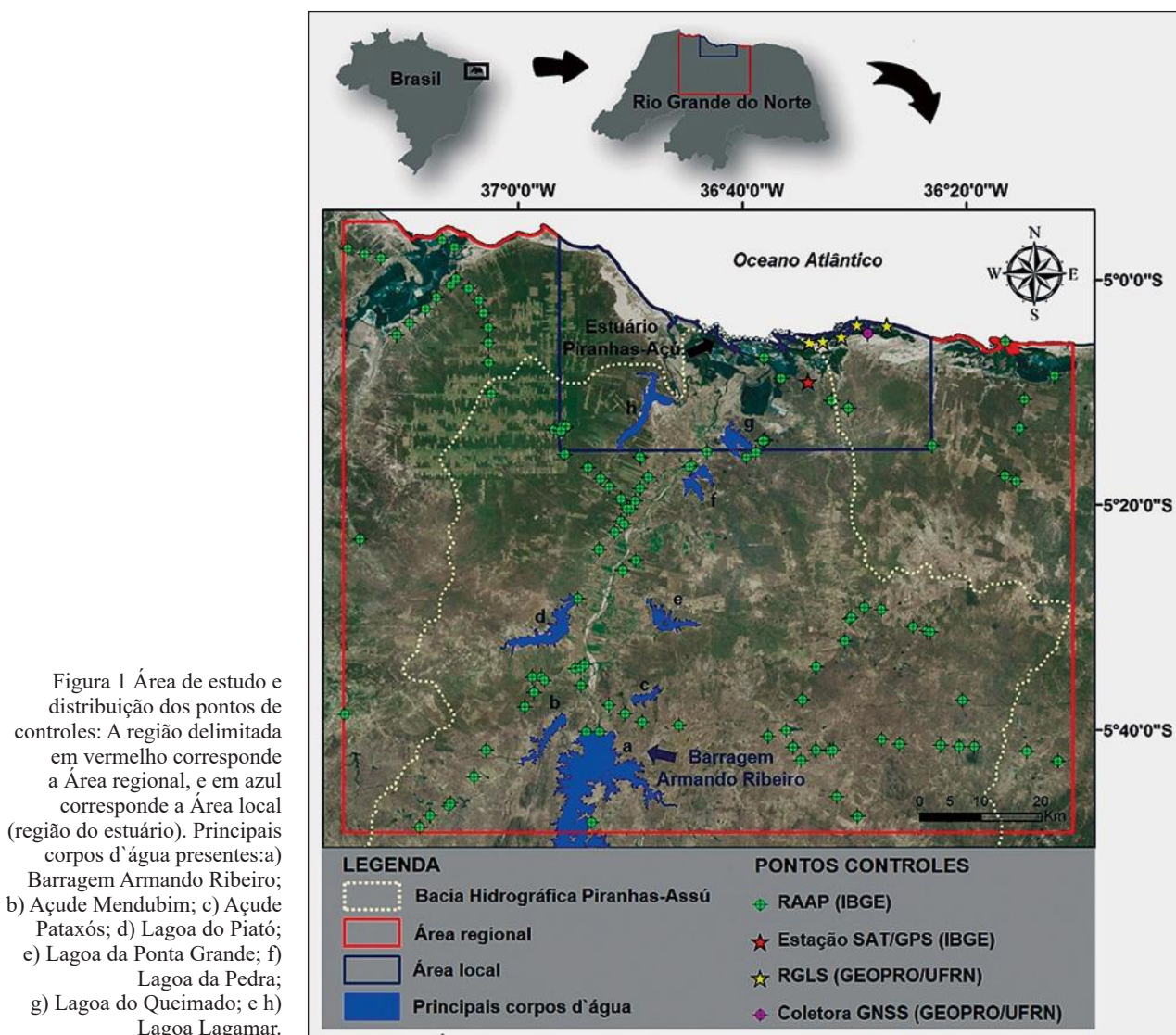
Ultimamente, uma das alternativas encontradas para a aquisição de MDE de alta qualidade vertical para pequenas regiões foi o uso de sensor LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado. O uso de *laser scanners* aerotransportados no Brasil é uma das mais recentes tecnologias para a obtenção de modelos digitais de Elevação (MDE), em alta precisão e em curto espaço de tempo, entretanto ainda demandam elevados custos operacionais (Aguilar *et al.*, 2010; Macedo *et al.*, 2013).

Nesse sentido, este estudo objetiva avaliar a qualidade vertical, fatores geomorfológicos influenciadores no erro vertical e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos a partir do SRTM e do LiDAR aerotransportado na Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, porção norte do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Tendo por finalidade, o desenvolvimento metodológico de avaliação e calibração de MDEs com elevada acurácia vertical para serem utilizados em futuros estudos ambientais, principalmente com enfoques hidrológicos e modelagem de inundações e enchentes.

2 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu é a maior da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com área total de 43.683 km². Seu território divide-se entre os Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%). Totalmente inserida em território de clima muito quente e semiárido, a bacia apresenta chuvas concentradas em poucos meses do ano (chuvosa se atrasando para o outono) e um padrão de forte variabilidade interanual, caracterizado pela alternância entre anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média, que resultam em secas prolongadas e baixa disponibilidade hídrica (ANA, 2016). Assim como os demais rios da bacia, o rio Piancó-Piranhas-Açu é um rio intermitente em condições naturais. Sua perenização ocorre

por meio de dois reservatórios de regularização construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS): Curema/Mãe d'Água, na Paraíba, e Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte. Esses reservatórios correspondem às principais fontes hídricas da bacia, responsáveis inclusive pelo atendimento de demandas de águas externas, que estão associadas a bacias adjacentes. Cabe destacar que a bacia, brevemente, também será receptora de água do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). A bacia Hidrográfica Piranhas-Açú é subdividida em 11 Unidades de Planejamento Hidrológico (UPHs), determinadas com base na hidrografia, presença de reservatórios de grande porte e unidades de gestão adotadas pelos Estados (ANA, 2016).



Uma das UPH de extrema importância para este sistema é a UPH Bacias Difusas do Baixo Açu. Esta, é responsável pelo deságue na foz do estuário Piranhas-Açu de todo o sistema hídrico. O setor industrial dessa UPH compreende essencialmente a exploração mineral, especialmente de sal, petróleo e gás. A extração de petróleo e gás natural é uma atividade de grande importância na bacia e na economia do Rio Grande do Norte, em função dos *royalties* gerados. Entre os quinze municípios potiguares produtores, nove pertencem a região em foco: Alto do Rodrigues, Areia Branca, Assú, Carnaubais, Macau, Pendências, Porto do Mangue, Serra do Mel e Upanema (IDEMA, 2005). A aquicultura e a pesca artesanal também têm sua importância na UPH Bacias Difusas do Baixo-Açu, além da agricultura irrigada, carcinicultura e salinas, que representa os principais segmentos de usuários do recurso hídrico da região (ANA, 2016).

Nesta pesquisa, a área de estudo compreende uma área de aproximadamente 10.742 km², na porção norte do Estado do Rio Grande do Norte. Essa área foi denominada como área regional, e foi delimitada com o intuito de cobrir toda a região da UPH Bacias Difusas do Baixo Açu, região esta que abrange todo o setor pós Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Figura 1). Além disso, dentro da área regional, foi recortada uma segunda área, denominada área local, de aproximadamente 536 km² e que envolve toda a região de estuário da área de estudo. Sobre a geomorfologia da área em estudo, observa-se a Superfície Cárstica e os Tabuleiros Costeiros, compostos por relevos tabulares amplos e pouco dissecados e por superfície pediplanada. Na foz do estuário Piranhas-Açu, nota-se uma ampla planície flúvio-marinha que constitui a Faixa Litorânea (Barreto *et al.*, 2004; ANA, 2016).

3 Metodologia

A metodologia empregada possui por princípio a utilização de pontos de controle de alta precisão vertical, oriunda de diversas bases de referências, aliada a uma robusta análise estatística para o emprego da avaliação e calibração dos MDEs SRTM e LiDAR, em duas áreas com dimensões diferentes, na região da UPH Bacias Difusas do Baixo Açu.

3.1 Base de Dados

Os dados necessários para a realização deste trabalho, constituem-se de 3 (três) principais tipos de fontes: I) Bases de referências geodésicas; II) Modelo digital de elevação da missão SRTM (*Shuttle*

Radar Topography Mission); e III) Modelo digital de elevação de sensor aerotransportado LiDAR (*Light Detection And Ranging*).

3.1.1 Bases de Referências Geodésicas - Pontos de Controle

Neste estudo, tomou-se como pontos de controles verticais a altimetria ortométrica, aqui denominadas como “Bases Referências” ou “Pontos de Controles. Foi construída uma malha com 110 pontos de controles com dados oriundos de 4 redes: (a) 99 pontos da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do IBGE; (b) 1 ponto da Rede Planimétrica do IBGE; (c) 5 pontos da Rede GNSS do Litoral Setentrional (RGLS) do GEPRO/UFRN; e (d) 5 pontos de controle GNSS coletados em campo, denominados de Coletora GNSS (GEOPRO/UFRN) (Figura 1).

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) do IBGE foi construída através da técnica de nivelamento geométrico de alta precisão, possibilitando a determinação de estações geodésicas dotadas de um valor de altitude referida ao Nível Médio do Mar (NMM) em Imbituba-SC. Essas estações são denominadas Referências de Nível (RRNN) e foram implantadas em todo o território brasileiro ao longo das rodovias e ferrovias a intervalos de 3 km, nos primeiros levantamentos e atualmente 2 km. Hoje a rede possui aproximadamente 68000 RRNN, e estão disponíveis no Banco de Dados Geodésicos (BDG) que podem ser adquiridos acessando o Portal Brasileiro de Dados Abertos (PBDA), pelo endereço http://dados.gov.br/dataset/cged_bdg_rn. Para este estudo, foram utilizados 99 pontos de estações da RAAP que estavam dentro da área de estudo e com um bom estado de conservação. Além dessas, foi também utilizada uma Estação Planimétrica (SAT/GPS) da Rede Planimétrica do IBGE (estação n° 92428, localizada no município de Macau-RN).

Também, foram utilizados 5 pontos da Rede GNSS do Litoral Setentrional (RGLS) do Estado do Rio Grande do Norte. A RGLS é uma rede de monitoramento GNSS, implantada pelo Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) (Santos & Amaro, 2011; Santos *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2015). Essa rede foi construída para

dar apoio básico aos levantamentos geodésicos de monitoramento costeiro na área próxima à Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT). As altitudes ortométricas das estações da RGLS foram determinadas com precisão centimétrica em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), pelo método de posicionamento relativo estático usando estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As altitudes ortométricas da RGLS foram calculadas por GPS no método relativo, usando referências de nível (RRNN) da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). Foram ainda utilizados 5 pontos de controle da base de dados do GEOPRO/UFRN. Esses pontos foram adquiridos em campo por meio de receptores GNSS, utilizando o método de posicionamento relativo estático GNSS com estações da RBMC.

Todos os 110 pontos das Bases Referências foram padronizados para o *Datum* horizontal SIRGAS2000, sistema de projeção UTM (Fuso: 24S / MC: 39° W.Gr) e modelo geoidal MAPGEO2010. Por fim, os dados foram exportados em formato *shapefile* com o auxílio do software ArcMap 10.1 (ESRI, 2011).

3.1.2 Shuttle Radar Topography Mission - MDE SRTM

Foram utilizados dados do SRTM com resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m no equador), resolução radiométrica de 16 bits, sistema de coordenadas geográficas, *Datum* horizontal WGS-1984 e *Datum* vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*). Esses dados, foram adquiridas nos servidores da *Earth Data* (NASA), a partir da interface desenvolvida por *Derek Watkins* (<http://dwtkns.com/srtm30m/>). Essa interface possui como principal vantagem das demais, a disponibilização de cenas do SRTM com um excelente processo de correção de *voids* (espaços vazios onde nenhum valor de elevação pôde ser determinado). A existência de *voids* causa problemas significativos na utilização de um MDE SRTM, especialmente na aplicação de modelos hidrológicos que requerem superfícies de fluxo contínuo. Foram realizados os downloads das cenas: S05W038, S05W037, S06W038 e S06W037.

Inicialmente as cenas foram submetidas ao processo de mosaico, no intuito de criar uma só

imagem que abrangesse toda área de estudo (Jensen, 2009). Em seguida foram substituídos por “0” (zero), os valores dos pixels negativos e aplicado uma máscara do limite continental para extração da porção oceânica. Por fim, foram extraídos os valores das alturas ortométricas dos pixels a partir da malha de pontos de controles, e exportada em forma de tabela para fins de análises estatísticas.

3.1.3 Light Detection And Ranging - MDE LiDAR Aerotransportado

Foi utilizado um MDE LiDAR aerotransportado, com resolução espacial horizontal de 5m e com cobertura para toda a área local. Esse MDE foi construído pela PETROBRAS, cedido em termo de cooperação técnica entre a referida instituição e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), mediante termo de confidencialidade. O levantamento se deu entre fevereiro e setembro de 2012, através de aerofotogrametria integrada. Nesse aerolevantamento, foi utilizado um equipamento modelo ALS60 fabricado pela Leica Geosystems. A densidade média de pontos foi de 4,2 por m², com frequência de 200.000 pulsos por segundo (200 kHz) e ângulo de abertura (FOV) 26°. A frequência de operação adotada foi de 160,2 kHz, com frequência de perfilamento de 65 Hz e velocidade média da aeronave de 190 km/h. O espaçamento médio de pontos foi de 0,41 m (na direção do voo) e de 0,80 m, na direção transversal ao voo. O sistema geodésico de referência adotado para planimetria foi o SIRGAS2000 e o sistema de projeção UTM (Fuso: 24S / MC: 39° W.Gr). Para a altimetria utilizou-se o modelo geoidal MAPGEO2010. A altura geométrica, foi convertida em altura ortométrica.

Por fim, foram extraídos os valores das alturas ortométricas dos pixels a partir da malha das Bases Referências, e exportada em forma de tabela para fins de análises estatísticas.

3.2 Análise dos Dados

As análises dos dados foram subdivididas em duas etapas. A primeira etapa, foi avaliar e calibrar o

MDE SRTM para a área regional. Nesta etapa, além de avaliar o erro altimétrico do MDE, foi investigado a influência da geomorfologia na variação deste erro.

Na segunda etapa, buscou-se avaliar e calibrar os MDEs SRTM e LiDAR para a área local.

3.2.1 Avaliação e Calibração do MDE SRTM para a Área Regional

Para avaliar e calibrar o MDE desta área, foi construído uma matriz com os valores das alturas ortométricas das bases referências e do SRTM. Esse conjunto de dados foi submetido a uma análise de Regressão Linear, com os valores das bases referências como variável independente e o SRTM, como variável dependente.

A análise de Regressão Linear é utilizada para verificar uma relação linear entre uma variável dependente e uma variável independente. É definida por uma função matemática:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i$$

Em que: Y_i é a variável explicada (dependente) (altitude ortométrica calibrada); α é a constante que representa a interceptação da reta com o eixo vertical; β é a constante que representa o declive (coeficiente angular) da reta; X_i é a variável explicativa (independente) (altitude ortométrica de referência); ϵ é uma variável aleatória que representa o erro experimental.

O modelo obtido pela regressão linear pode ser avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2). Obtém-se a medida de ajustamento de um modelo indicando, em um intervalo de 0 a 1, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O R^2 é calculado por:

$$\overline{\Delta H} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{Base,i} - H_{MDE,i})}{n}$$

Em que: O_i é o valor da altura ortométrica do MDE no ponto i , P_i é o valor da altura ortométrica dos pontos de controles (bases referências) no ponto i , \bar{O} é a média da altura ortométrica do MDE, \bar{P} é a média das alturas ortométricas dos pontos de controle (bases referências) e n é o número de observações.

Em seguida, o MDE SRTM foi calibrado a partir do modelo proposto pela regressão linear. Logo após, os MDEs (origina e o calibrado) foram submetidos a uma análise estatística descritiva e a comparação quanto à média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) e ao valor da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE – *Root mean square error*).

A média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) indica se um MDE tem um deslocamento vertical geral, positivo ou negativo, do nível do solo verdadeiro (Gesch *et al.*, 2012). É feita conforme a seguinte expressão:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2][\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]}}$$

Onde, H_{Base} é o valor da altura ortométrica observada de referência e H_{MDE} é o valor da altura ortométrica do modelo no ponto i .

A RMSE é uma medida estatística da magnitude do erro frequentemente usada para comparar modelos de elevações (e.g., Falorni *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2006; Medeiros *et al.*, 2009; Chagas *et al.*, 2010; Hirt *et al.*, 2010; Mouratidis *et al.*, 2010; Sánchez & Villarán, 2012; Macedo *et al.*, 2013; Moura *et al.*, 2014; Mukul *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2015; Mukul *et al.*, 2016; Patel *et al.*, 2016; Mukul *et al.*, 2017; Marini *et al.*, 2017). Ela avalia as diferenças individuais entre os valores observados pelos valores modelados. Essas diferenças individuais também são chamadas de resíduos, e a RMSE serve para agregá-las em uma única medida de poder preditivo. A RMSE de um modelo em relação à sua observação é definida como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{Base,i} - H_{MDE,i})^2}{n}}$$

Onde, H_{Base} é o valor da altura ortométrica observada de referência e H_{MDE} é o valor da altura ortométrica do modelo no ponto i .

Para avaliar a influência da geomorfologia nas Variações das Alturas Ortométricas (ΔH), foram tomadas como variáveis geomorfológicas a altura ortométrica das bases referências (H), a declividade do terreno e o aspecto da declividade do terreno. Essas duas últimas variáveis geomorfológicas, extraídas diretamente do SRTM original. A declividade e o

aspecto (direção da declividade) foram calculados a partir das derivadas parciais da altura ortométrica do SRTM ao longo das direções Este (x) e Norte (y), conforme as equações abaixo (Burrough, 1987; Miliarensis & Paraschou, 2005):

$$\text{Declividade} = \sqrt{\left(\frac{dH}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH}{dy}\right)^2}$$

$$\text{Aspecto} = \arctan\left(\frac{-dH/dy}{dH/dx}\right)$$

A declividade e o aspecto foram expressas em graus. Quando utilizado na estatística descritiva a declividade foi dividida em 2 classes (“< 5°” e “5° a 10°”), e o aspecto padronizado para as oito direções geográficas (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). Foi determinado como “plano” a declividade com valor igual a 0°.

Os dados utilizados para a investigação inferencial da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) na área regional, consistiram de uma matriz formada pelos valores das variáveis “ ΔH ”, “H” (altura ortométrica das bases referências), “Declividade” (declividade do SRTM) e “Aspecto” (aspecto da declividade do SRTM). Essas variáveis foram submetidas ao processo de padronização de dados, através do método Escore-Z (também conhecido como escore padronizado). O escore-Z representa o número de desvios-padrão que separa uma variável aleatória X da média do grupo. Esse tipo de transformação é muito utilizada em padronização de variáveis, pois não altera a forma de distribuição da variável original e gera uma nova variável com média 0 e variância 1. Dessa forma, quando muitas variáveis com diferentes ordens e grandeza estiverem sendo utilizadas em uma análise, o processo de padronização escore-Z fará com que todas as novas variáveis padronizadas apresentem a mesma distribuição, com ordens e grandeza iguais (Fávero *et al.*, 2009).

Em seguida os dados padronizados foram testados quanto a multicolinearidade. Para isso, uma matriz de correlação de Spearman (Spearman, 1904) foi construída para avaliar a multicolinearidade dos dados, sendo preferível por evitar suposições de linearidade entre as variáveis (Zar, 2010). De acordo com Neter *et al.* (1990) e Graham (2003), as variáveis com alta colinearidade podem resultar

em estimativas de difícil interpretação como efeitos independentes. Assim, valores modulares do coeficiente de correlação de Spearman superiores a 0.5 são indicativos de alta colinearidade de uma variável (Booth *et al.*, 1994).

Por fim, foi realizado um Modelo Aditivo Generalizado (MAG) com as variáveis “H”, “Declividade” e “Aspecto” como variáveis independentes e, “ ΔH ” como variável dependente. O modelo aditivo generalizado é uma extensão não paramétrica do modelo linear generalizado (i.e., cuja forma não é especificada), estimada através de curvas de alisamento (Hastie & Tibshirani, 1990). Com essa substituição, não é necessário assumir uma relação linear entre a variável exploratória e as variáveis explicativas, como no Modelo Linear Generalizado ou em uma Regressão Linear simples. De fato, não é necessário nem mesmo conhecer previamente a forma dessa relação, mas é possível estimá-la a partir de um conjunto de dados (Conceição *et al.*, 2001). Essa função estimada, também chamada de curva alisada permite então descrever a forma, e mesmo revelar possíveis não linearidades nas relações estudadas, uma vez que não apresenta a estrutura rígida de uma função paramétrica (Wood *et al.*, 2016). Para elaboração do MAG foi utilizado o pacote “gam” (Wood *et al.*, 2016) do software R v.3.4.1 (R Development Core Team, 2017).

3.2.2 Avaliação e Calibração do MDE SRTM e LiDAR para a Área Local

Para avaliar e calibrar os MDEs desta área menor, foi construído uma segunda matriz, com os valores das alturas ortométricas das bases referências, do SRTM e do LiDAR aerotransportado. Esse conjunto de dados também foi submetido a análises de regressões lineares. A primeira regressão linear teve os valores das bases referências como variável independente e o SRTM, como variável dependente. E a segunda regressão linear, alterando somente a variável independente pelo LiDAR. Em seguida, os modelos foram calibrados em relação as suas predições resultantes das regressões lineares. Além disso, foram submetidos a uma análise estatística descritiva e a comparação quanto ao valor da média de ΔH e RMSE.

Por fim, todos os dados foram submetidos a verificação de parametricidade (normalidade e

homogeneidade), por meio dos testes de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) e Levene (Levene, 1960). Ao verificar que não ocorreu parametricidade dos dados, foi realizado uma comparação dos grupos por meio do teste não paramétrico Teste de Friedman (Friedman, 1940), seguido pelo teste *post-hoc* Student–Newman–Keuls. O Teste de Friedman, segundo Diggle (1988) e Crowder & Hand (1990), pode ser usado para designar medidas feitas para uma mesma variável resposta na mesma localização geográfica em mais de uma ocasião (medidas repetidas).

Em todas as análises estatísticas foi adotado o valor de significância de 5% (Zar, 2010) e foram realizadas no software R v.3.4.1 (R Development Core Team, 2017).

4 Resultados e Discussão

Os resultados alcançados neste trabalho, são apresentados sistematicamente a seguir.

4.1 Avaliação e Calibração do MDE SRTM para a Área Regional

Foi possível avaliar e calibrar o Modelo Digital de Elevação do SRTM para a área regional, a partir dos 110 pontos de controles. A análise de regressão linear revelou uma forte correlação entre as Bases Referências e os dados de altimetria SRTM, gerando um modelo altamente robusto com $R^2 = 0,9983$ e $p < 0,001$ (Figura 2). O valor de R^2 acima de 0,99 indicam que quase 100% das células do MDE, que geograficamente coincidem com os pontos de controle, possuem grandezas compatíveis com àquelas das Bases Referências, além de resíduos de baixa magnitude. O modelo de correção/calibração do SRTM a partir dos pontos de controle foi determinado como $y = 0,9966x - 1,8568$.

Elevados valores de R^2 , acima de 0,9, são amplamente encontrados na literatura, em estudos de calibração do MDE SRTM a partir dos dados de pontos de controle de alta precisão vertical (e.g., Gorokhovich & Voustianiouk, 2006; Medeiros *et al.*, 2009; Forkuor & Maathuis, 2012; Athmania & Achour, 2012; Santillan & Makinano-Santillan, 2016).

A estatística descritiva dos dados, para toda a área regional, segue na Tabela 1, incluindo nela

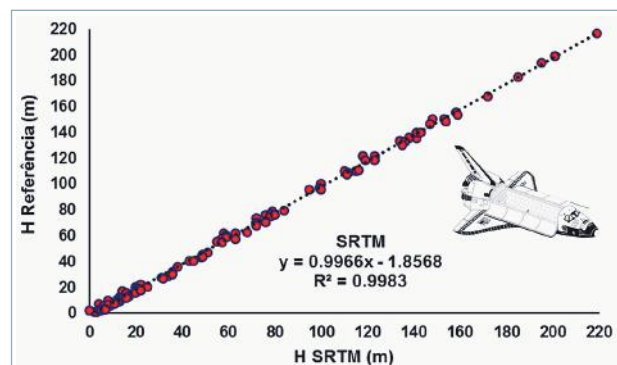


Figura 2 Resultado gráfico da análise de regressão linear: H SRTM x Bases de Referências.

o SRTM calibrado, a partir do modelo proposto anteriormente. Analisando a Tabela 1, foi possível verificar uma média da variação da altura ortométrica (ΔH) da Bases Referências em relação ao SRTM não calibrado, com o valor de $-2,07m$. Significando assim, que o plano do MDE SRTM original possui um deslocamento negativo em relação ao plano da rede de pontos de controles. O valor encontrado em módulo, $2m$, é muito parecido com o encontrado por Patel *et al.* (2016), durante trabalho de validação do SRTM para uma área na capital de Madia Pradexe (Índia). Medeiros *et al.*, (2009), em uma área de estudo que englobava todo o Estado de Goiás e o Distrito Federal, encontraram uma média de ΔH do SRTM em relação aos pontos de controle adotados, aproximadamente de $-3m$. Nesse último estudo, os autores utilizaram 559 referências de níveis.

Em relação à média de ΔH do SRTM calibrado ser encontrado no valor igual a zero, já era de se esperar. Esse fator se deve ao ajustamento do plano do MDE ao plano da rede de pontos de controles após calibração. A avaliação dos modelos com base na Variação da Altura Ortométrica (ΔH) torna-se mais compreensível quando estes são reclassificados em intervalos de classes (Figura 3). Investigando a estratificação dessa variação em classes de altura ortométrica, foi possível observar uma diminuição de ΔH do SRTM não calibrado para o SRTM calibrado, em quase todas as classes, exceto na classe de 120 a 130m. Após a calibração, ΔH teve uma evolução média de 90% nas classes de altura ortométricas para toda a área regional.

Em relação a RMSE do MDE SRTM original (SRTM não calibrado), foi encontrado uma RMSE de $3,10m$, em comparação aos pontos de controles. Essa precisão é 2 vezes maior do que a divulgada

	H_{Bases} (m)	H_{SRTM} (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{SRTM}$	H_{SRTM} Calibrado (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{SRTM}$ Calibrado
Mínimo	0.96	0.00	-5.70	-1.86	-3.72
Mediana	51.04	53.00	-2.22	50.96	-0.16
Média	62.20	64.27	-2.07	62.20	0.00
Máximo	216.77	219.00	3.95	216.40	6.20
Erro padrão	5.32	5.33	0.22	5.31	0.22
Variância	3108.35	3124.04	5.39	3102.83	5.35
Desvio padrão	55.75	55.89	2.32	55.70	2.31
RMSE (m)		3.10		2.30	

Tabela 1 Estatística descritiva dos dados altimétricos para toda a área de estudo (Área Regional). $n = 110$.

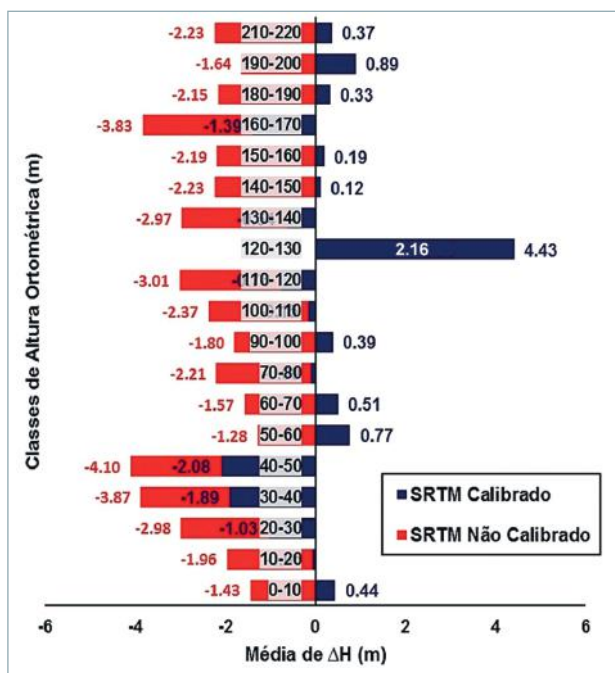


Figura 3 Comportamento da Média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) em relação as classes de Altura Ortométrica (H) para o “SRTM_{Calibrado}” e “SRTM_{Não Calibrado}”.

nas especificações originais do SRTM (6,20m para a América do Sul). Além disso, ao calibrar o SRTM, foi verificada uma extrema melhora da RMSE, onde foi encontrado o valor de 2,30m. Ocorrendo assim uma diminuição em 26% no valor da RMSE do SRTM calibrado em relação ao SRTM não calibrado (Tabela 1).

Gorokhovich & Voustianiouk (2006), observaram em estudos realizados nos EUA e na Tailândia, que a precisão vertical do SRTM, eram

de duas a quatro vezes maiores que os valores apresentados nas especificações originais deste produto para as regiões estudadas. Para o Nordeste de Mindanao (Filipinas), Santillan & Makinano-Santillan (2016) verificaram que o SRTM para a região possuía uma precisão melhor do que a informada nas especificações originais desse MDE. Eles encontraram uma média de $\Delta H = 6,21m$ e $RMSE = 8,28m$, enquanto que nas especificações a média de ΔH esperado era de 10m e $RMSE$ de 16m.

Diferentemente dos autores mencionados, Santos *et al.* (2006), em um estudo de avaliação da precisão vertical para uma área na região da Amazônia, encontrou uma $RMSE$ de 7,642m, valor este, superior ao divulgado nas especificações originais. Outro trabalho, que se destaca pela elevada diferença na $RMSE$ do SRTM ao tabelado, é o trabalho de Sánchez & Villarán (2012). Estes, encontraram uma precisão vertical entre 70 a 117m, para todo o território do Peru. Os mesmos autores concluíram também que, essa variação poderia não depender da altura e nem da localização geográfica do determinado local, mas sim, fruto da função da cobertura de nuvens densas com partículas de água e elevação do ângulo do sensor durante a aquisição dos dados. Mukherjee *et al.* (2013) reforçam que a rugosidade do terreno (geomorfologia) influencia negativamente a precisão vertical do MDE SRTM.

Além dos trabalhos citados, é possível encontrar na literatura estudos de validação do SRTM a partir de pontos de controles, com valores de erro vertical próximos daqueles informados pela especificação do produto. Exemplos destes, são os trabalhos de Falorni *et al.* (2005) e Mouratidis *et al.* (2014), desenvolvidos em Oklahoma (USA) e no Norte da Grécia, respectivamente.

Ao investigar estatisticamente as possíveis tendências das variáveis geomorfológicas na variação da altura ortométrica (ΔH) do SRTM não calibrado, por meio da aplicação de modelos aditivos generalizados, foi possível obter um modelo inferencial para a variável preditiva. Além disso, as análises descritivas demonstraram também possíveis relações de outras variáveis explicativas em ΔH .

Inicialmente a matriz de correlação de Spearman mostrou uma baixa correlação entre as variáveis geomorfológicas, todos os valores em módulo, abaixo de 0.2. Demonstrando assim uma

baixa colinearidade ente essas variáveis, ou seja, cada variável explicativa não é influenciada por nenhuma outra variável explicativa (Tabela 2). Entretanto, o maior valor em módulo encontrado na comparação com a variável ΔH , foi a variável “Aspecto”, que apresentou $r = -0.20$. Indicando assim que, 20% da variabilidade de ΔH é controlada pelo Aspecto da declividade. No total, as variáveis “H”, “Declividade” e “Aspecto” representaram 39% da variabilidade de ΔH .

Ao realizar o MAG entre as variáveis geomorfológicas e a variação da altura ortométrica, foi possível encontrar um modelo robusto de explicação inferencial para ΔH apenas com a inclusão da variável “Aspecto”. Foi encontrado um modelo, explicado pela suavização do Aspecto ($p < 0,02$) ($R^2 = 0,102$) (Tabela 2). A orientação da face da declividade está intimamente e de forma não linear influenciando na variação do erro do MDE SRTM na área de estudo (Figura 4).

Matriz de Correlação de Spearman				
	ΔH	H	Declividade	Aspecto
ΔH	1.00	---	---	---
H	-0.10	1.00	---	---
Declividade	-0.09	0.15	1.00	---
Aspecto	-0.20	0.01	0.10	1.00
Modelo Aditivo Generalizado				
Fórmula: $\Delta H = s(\text{Aspecto})$				
	Estimado	Erro Pad.	Valor t	P
(Intercepto)	-2.065	0.210	-9.856	<0.01
Significância aproximada do termo suavizado				
	edf	Ref.df	F	P
s(Aspecto)	3.477	4.296	3.064	<0.01
R^2 (ajustado) = 0.102				
Desvio explicado: 13%				
GCV = 5.0311; Scale est. = 4.8263; n = 110				

Tabela 2 Resultado da Matrix de Correlação e resumo do Modelo Aditivo Generalizado.

Observando a estatística descritiva da RMSE isoladamente nas variáveis geomorfológicas, foi possível verificar o comportamento desse erro em cada variável explicativa (Figura 5a, 5b e 5c). Nas classes de altura ortométrica, foram encontrados os menores valores de RMSE nas classes de “180 a 200m” (RMSE= 1.74), seguido pelas classes “200

a 220m” (RMSE= 2.16) e “0 a 20m” (RMSE= 2.45) (Figura 5a).

Já a declividade, apresentou uma leve diminuição na classe “<5°” em relação a classe “5 a 10°”. Foram encontrados os valores de RMSE de 3.09 e 3.14, respectivamente (Figura 5b). Possivelmente, essa leve diminuição se deva ao fato do conjunto de dados já se encontrar em uma faixa muito baixa de declividade, apresentando uma amplitude apenas de 10°. Entretanto, os valores apresentados corroboram com as hipóteses encontradas na literatura, em que os valores de RMSE tendem a diminuir com a diminuição da declividade. Essa hipótese foi ainda mais reforçada ao analisar somente os valores de ΔH nas regiões em que não apresentavam declividade (declividade= 0°), onde foi observado um valor da RMSE= 2.34. Em relação ao aspecto, não foi observado muita variação da RMSE, exceto em uma leve queda nas classes de SW, apresentando um valor da RMSE= 2.54 (Figura 5c).

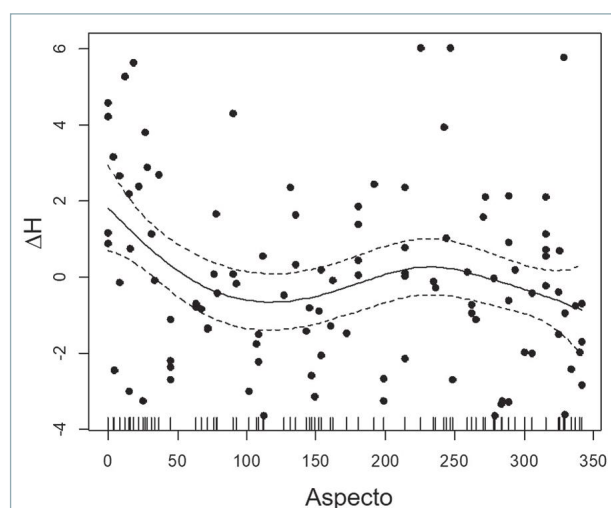


Figura 4 Curvas de alisamento da variação da altura ortométrica em função do aspecto da declividade.

4.2 Avaliação e Calibração do MDE SRTM e LiDAR para a Área Local

Foi possível avaliar e calibrar os MDEs do SRTM e do LiDAR para a área local, a partir das bases referências. Também, como na etapa anterior, as análises de regressões lineares tiveram fortes correlações entre as Bases Referências e os dados do LiDAR ($R^2 = 1$) ($p < 0,001$), e com os dados do SRTM ($R^2 = 0,9981$) ($p < 0,001$), para a pequena área do estuário Piranhas-Açú (Figura 6). Para o MDE LiDAR, o modelo de correção/calibração,

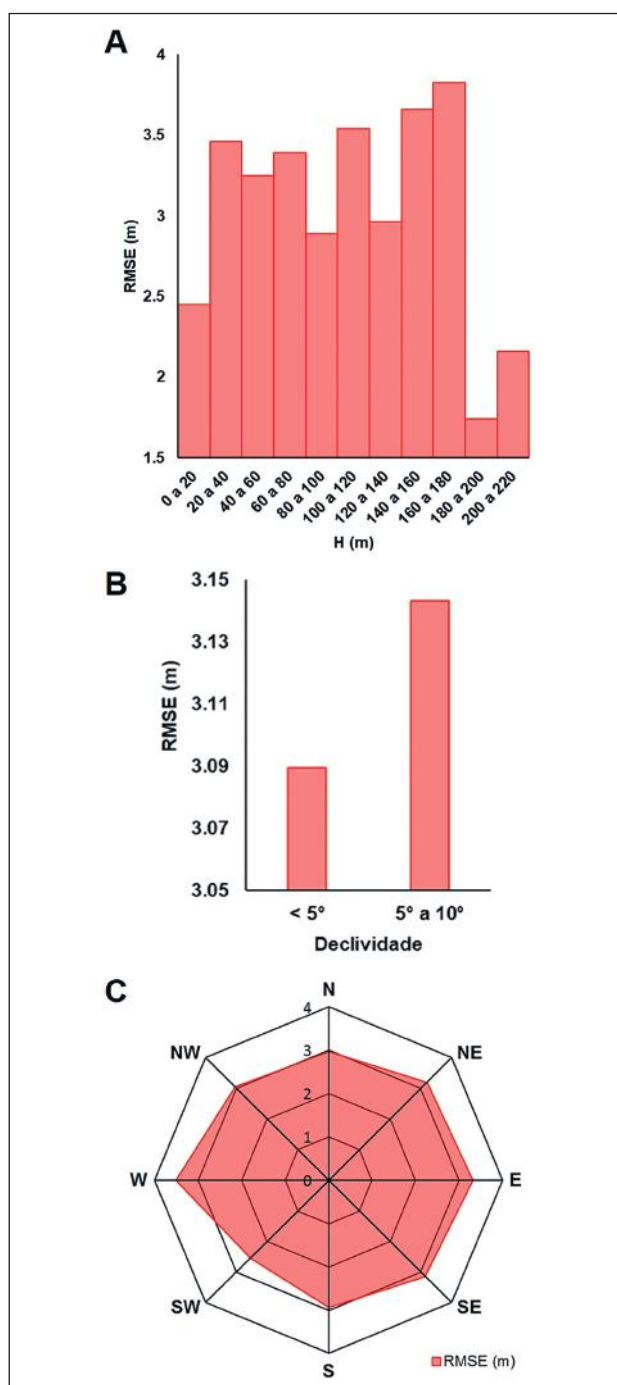


Figura 5 Gráficos: (A) Comportamento da RMSE nas classes de altura ortométrica (H); (B) Comportamento da RMSE nas classes de declividade; e (C) Comportamento da RMSE nas classes de aspecto.

a partir dos pontos de controle foi determinado como $y = 0,9991x + 0,1836$. Enquanto que, para o MDE SRTM, o modelo de correção/calibração foi estimado como $y = 0,9789x - 1,0357$.

A estatística descritiva dos dados, para a área local, segue na Tabela 4, incluindo nela, os MDEs

calibrados LiDAR e SRTM. Analisando a Tabela 4, foi possível verificar uma média da variação da altura ortométrica (ΔH) da Bases Referências em relação ao LiDAR de 0,16m, e em relação ao SRTM de -1,54m.

Ao analisar a RMSE dos MDEs em relação aos pontos de controles, foi verificado que o LiDAR não calibrado, o LiDAR calibrado, o SRTM não calibrado e o SRTM calibrado, apresentaram RMSE de 0,32m, 0,27m, 2,53m e 1,80m, respectivamente.

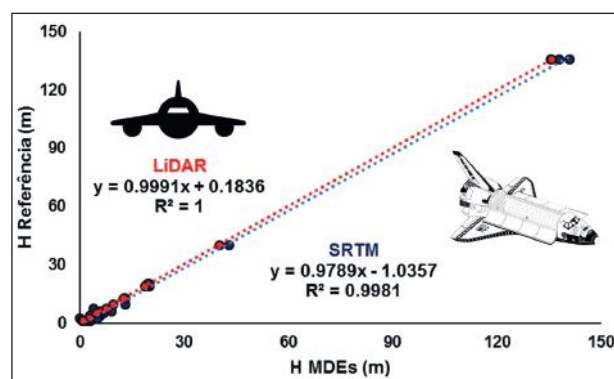


Figura 6 Resultado gráfico da análise de regressão linear: H SRTM x Bases de referências e H LiDAR x Bases de Referências.

O fato do SRTM apresentar melhor acurácia vertical na área local, em comparação com a área maior (área regional), possivelmente pode ser explicado devido a área menor possuir elevações mais baixas e áreas mais planas. Forkuor & Maathuis (2012), quando comparou dois setores em Gana, concluíram que a precisão vertical do SRTM era melhor em terreno plano e menos complexo. Mesmo sendo um MDE com uma excelente qualidade vertical (RMSE= 0,32m), o LiDAR original, apresentou uma elevada evolução na diminuição de seu RMSE quando calibrado com os pontos de controles dispostos na área de estudo. A diminuição do RMSE do LiDAR calibrado em relação ao LiDAR não calibrado foi de 15%, enquanto que o SRTM calibrado apresentou uma diminuição de 29% em relação ao SRTM não calibrado (Tabela 4).

Ao aplicar o Teste de Friedman, foi observado uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($p < 0,001$) (Tabela 5). Em seguida, verificou-se durante comparação múltipla dos grupos, por meio do método Student-Newman-Keuls, que os únicos grupos que não deferiram estatisticamente significativo ($p < 0,05$), foram as Bases Referências x LiDAR calibrado, LiDAR calibrado x SRTM

calibrado, e Bases Referências x SRTM calibrado (Tabela 5). Ou seja, os pontos de controles, o MDE Lidar e o MDE SRTM estavam agora no mesmo plano referencial (provado estatisticamente). Reforçando assim, a robustez da metodologia empregada durante calibração dos MDEs com as Bases Referências (pontos de controles).

5 Conclusões

As análises apresentadas neste documento indicam que:

1. A precisão vertical do modelo digital de elevação do SRTM original, para nosso conjunto de dados, mostrou ser aproximadamente duas vezes maior do que o valor de 6,20m, apresentado nas especificações originais do produto. Esse valor chegou a ser melhorado em 26 a 29% após calibração com pontos de controle de alta acurácia.

2. A geomorfologia do terreno influencia no erro altimétrico do MDE SRTM na área de estudo, corroborando assim com as hipóteses encontradas na literatura. O aspecto influencia de forma não linear no erro do MDE, enquanto que em áreas de menores declividades a RMSE tende a diminuir.

3. O MDE LiDAR aerotransportado mesmo apresentando melhor RMSE para a área local, teve uma melhora de 15% após calibração.

4. Os modelos de calibrações desenvolvidos nesta pesquisa podem ser usados em futuros trabalhos com MDEs na área de estudo, principalmente para modelagens hidrológicas e de inundações/enchentes.

5. Os resultados encontrados neste trabalho, aliados aos resultados encontrados na literatura, corroboram com a hipótese da adoção obrigatória da “calibração de MDE por meio de pontos de controle

Teste de Friedman			
Grupo	Mediana	25%	75%
Bases Referências	5.66	1.09	18.95
LiDAR	6.50	3.00	20.00
LiDAR _{Calibrado}	5.35	0.85	18.67
SRTM	5.33	1.90	18.54
SRTM _{Calibrado}	5.53	1.03	18.84
N=18; Qui-quadrado= 30.089; GL= 4; p < 0.001			
Resultado do teste de comparação múltipla (método Student-Newman-Keuls)			
Comparação	Diferença entre Ranks	q	p < 0.05
SRTM x LiDAR	51	7.603	Sim
SRTM x Bases Referências	34	6.208	Sim
SRTM x SRTM _{Calibrado}	31	7.307	Sim
SRTM x LiDAR _{Calibrado}	29	9.667	Sim
LiDAR _{Calibrado} x LiDAR	22	4.017	Sim
LiDAR _{Calibrado} x Bases Referências	5	1.179	Não
LiDAR _{Calibrado} x SRTM _{Calibrado}	2	0.667	Não
SRTM _{Calibrado} x LiDAR	20	4.714	Sim
SRTM _{Calibrado} x Bases Referências	3	1.000	Não
Bases Referências x LiDAR	17	5.667	Sim

Tabela 5 Teste de Friedman e teste *post-hoc* para os dados altimétricos no recorte do Estuário Piranhas-Açú.

	H _{bases} (m)	H _{LiDAR} (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{LiDAR}$	H _{LiDAR Calibrado} (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{LiDAR Calibrado}$	H _{SRTM} (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{SRTM}$	H _{SRTM Calibrado} (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{SRTM Calibrado}$
Mínimo	0.96	0.82	-0.31	1.00	-0.49	0.00	-5.32	-1.04	-2.18
Mediana	5.66	5.35	0.16	5.53	0.01	6.50	-1.98	5.33	-0.84
Média	22.51	22.35	0.16	22.51	0.00	24.06	-1.54	22.51	0.00
Máximo	135.68	135.71	0.82	135.77	0.65	141.00	3.57	136.99	4.69
Erro padrão	9.98	9.99	0.07	9.98	0.07	10.19	0.49	9.97	0.44
Variância	1792.77	1795.94	0.08	1792.71	0.08	1867.23	4.27	1789.27	3.44
Desvio padrão	42.34	42.38	0.28	42.34	0.28	43.21	2.07	42.30	1.86
RMSE (m)		0.32		0.27		2.53		1.80	

Tabela 4 Estatística descritiva dos dados altimétricos para o recorte do Estuário Piranhas-Açú. n= 18.

de alta precisão”, como etapa de pré-processamento digital. Visando a melhoria da precisão vertical, aplicado em trabalhos regionais ou locais que necessitem dessas informações.

6. Novos estudos devem ser encorajados visando a melhoria da compreensão e as potencialidades altimétricas do SRTM em outros contextos topográficos e geomorfológicos.

6 Agradecimentos

Os autores desejam reconhecer em especial ao Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a PETROBRAS, pela disponibilidade de uso do Modelo Digital de Elevação LiDAR.

7 Referências

- Aguilar, F.J.; Millis, J.P.; Delgado, J.; Aguilar, M.A.; Negreiros, J.G. & Pérez, J.L. 2010. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1): 103-110.
- ANA - Agência Nacional das Águas. 2016. *Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu*. Agência Nacional das Águas, Brasília-DF. 167p.
- Athmania, D. & Achour, H. 2014. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sens.*, 6(5): 4600-4620.
- Barreto, A.M.F.; Suguio, K.; Bezerra, F.H.R.; Tatum, S.H.; Yee, M. & Giannini, P.C.F. 2004. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. *Geol. USP Sér. Cient.*, 4(2): 1-12.
- Booth, G.D.; Niccolucci, M.J. & Schuster, E.G. 1994. *Identify proxy sets in multiple linear regression: an aid to better coefficient interpretation*. Research paper INT-470. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, Utah.
- Chagas, C.S.; Fernandes Filho, E.I.; Rocha, M.F.; Carvalho Júnior, W. & Souza Neto, N.C. 2010. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(2): 218-226.
- Chen, Y.; Li, J.; Wang, H.; Qin, J. & Dong, L. 2017. Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(2): 735-749.
- Conceição, G.M.S.; Saldiva, P.H.N. & Singer, J.M. 2001. Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbimortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo. *Rev. Bras. Epidemiol.*, 4(3): 206-219.
- Correa, N.F.; Ribeiro, V.O.; Miotto, C.L. & Paranhos Filho, A.C. 2017. Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(1): 217-225.
- Costa, C.A.G.; Teixeira, A.S.; Andrade, E.M.; Lucena, A.M.P. & Castro, M.A.H. 2010. Análise da influência vegetal na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. *Revista Ciência Agronômica*, 41(2): 222-230.
- Crowder, M.J. & Hand, D.J. 1990. *Analysis of repeated measures*. London: Chapman & Hall.
- Diggle, P.J. 1988. An approach to the analysis of repeated measurements. *Biometrics*, 44: 959-971.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. 2011. *ArcGIS Desktop: Release 10*. Redlands, CA, U.S.A.
- Falorni, G.; Teles, V.; Vivoni, E.R.; Bras, R.L. & Amaratunga, K.S. 2005. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research*, 110(F02005): 1-20.
- Fávero, L.P.; Belfiore, P.; Silva, F.L. & Chan, B.L. 2009. *Análise de dados: Modelagem multivariada para tomada de decisões*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Felícísimo, A.M. 1994. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(4): 29-33.
- Forkuor, G. & Maathuis, B. 2012. Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana - Implications for Hydrological and Environmental Modeling. In: PIACENTINI, T. (ed.), *Studies on Environmental and Applied Geomorphology*. In Tech: Rijeka, Croatia, p. 219-240.
- Friedman, M. 1940. A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(1): 86-92.
- Gesch, D.; Oimoen, M.; Zhang, Z.; Meyer, D. & Danielson, J. 2012. Validation of the ASTER global digital elevation model version 2 over the conterminous United States. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B4: 281-286.
- Gorokhovich, Y. & Voustianiouk, A. 2006. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104(4): 409-415.
- Graham, M. 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 84(11): 2809-2815.
- Hastie, T. & Tibshirani, R. 1990. *Generalized additive models*. London: Chapman & Hall.
- Hirt, C.; Filmer, M.S. & Featherstone, W.E. 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3): 337-347.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. 2005. *Projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico dos Estuários do Rio Grande do Norte - ZEE/RN*. Natal-RN. 35p.
- Jarvis, A.; Rubiano, J.; Nelson, A.; Farrow, A. & Mulligan, M. 2004. *Practical use of SRTM data in the tropics - comparisons with digital elevation models generated from cartographic data*. Working document no. 198. Cali: CIAT. 31p.
- Jensen, J.R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução da Segunda Edição. São José dos Campos, Parêntese Editora. 598p.
- Jolliffe, I. 2002. *Principal component analysis*. John Wiley & Sons, Ltd. 487 p.
- Levene, H. 1960. Robust Tests for Equality of Variances. In: OLKIN, I. (ed.). *Contributions to Probability and Statistics*. Stanford Univ. Press, p. 278-292.
- Macedo, R.C.; Santos, J.R. & Soares, J.V. 2013. Validação de modelo digital de terreno em área florestal com relevo ondulado, gerado a partir de dados lidar. *Revista Brasileira de Cartografia*, 65(4): 695-702.
- Marini, L.B.; Marcato Junior, J.; Ramos, A.P.M.; Paranhos

- Filho, A.C.; 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*, 40(3): 48-54.
- Medeiros, L.C.; Ferreira, N.C. & Ferreira, L.G. 2009. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, 61(2): 137-151.
- 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): 1-14.
- Mouratidis, A.; Briole, P. & Katsambalos, K. 2010. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23): 6205-6222.
- Mukherjee, S.; Joshi, P.K.; Mukherjee, S.; Ghosh, A.; Garg, R.D. & Mukhopadhyay, A. 2013. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 205-217.
- Mukul, M.; Srivastava, V. & Mukul, M. 2015. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*, 124(6): 1343-1657.
- Mukul, M.; Srivastava, V. & Mukul, M. 2016. Accuracy analysis of the 2014–2015 Global Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc-sec C-Band height model using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*, 125(5): 909-917.
- Mukul, M.; Srivastava, V.; Jade, S. & Mukul, M. 2017. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 7: 41672.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. 2017. *U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data*. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em 03 jul. 2017.
- Neter, J.; Wasserman, W. & Kutner, M. 1990. *Applied linear statistical models*. 2nd ed. Richard E. Irwin, Inc., Homewood, IL.
- Patel, A.; Katiyar, S.K. & Prasad, V. 2016. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(1): 7-16.
- Petrasova, A.; Mitasova, H.; Petras, V. & Jeziorska, J. 2017. Fusion of high-resolution DEMs for water flow modeling. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(6): 1-8.
- Pires, J. M.; Nascimento, M.C.; Santana, R.M. & Ribeiro, C.A.A.S. 2005. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(2): 39-47.
- R Development Core Team. 2017. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org/>>.
- Ribeiro, H.J. & Ferreira, N.C. 2014. Análise Comparativa de Redes Hidrológicas Geradas a Partir de Superfícies Hidrológicamente Consistentes. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20(4): 784-805.
- Rodríguez, E.; Morris, C.S. & Belz, J.E. 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3): 249-260.
- Sánchez, E.P. & Villarín, R.F. 2012. SRTM 3" comparison with local information: Two examples at national level in Peru. *Journal of Applied Geodesy*, 6(2): 75-81.
- Santillan, J.R. & Makinano-Santillan, M. 2016. Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMs over northeastern Mindanao, Philippines. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4: 149-156.
- Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. 2011. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Bol. Ciênc. Geod.*, 17(4): 571-585.
- Santos, P.R.A.; Gaboardi, C. & Oliveira, L.C. 2006. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 58(1): 101-107.
- Santos, M.S.T.; Amaro, V.E. & Souto, M.V.S. 2011. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(5): 663-681.
- Santos, A.L.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2014. Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na ilha barreira do corta cachorro, litoral do Rio grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3): 425-442.
- Santos, A.L.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2015. Avaliação de metodologia de aquisição de dados para representação de feições morfológicas de praias arenosas através de modelo digital de elevação. *Mercator*, 14(2): 137-155.
- Shapiro, S.S. & Wilk, M.B. 1965. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4): 591-611.
- Spearman, C. 1904. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1): 72–101.
- Thompson, J.A.; Bell, J.C. & Butler, C.A. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. *Geoderma*, 100(1/2): 67-89.
- Valeriano, M.M. & Carvalho Júnior, O.A. 2003. Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 4(1): 17-29.
- Van Niel, T.G.; Mevicar, T.R.; Li, L.; Gallant, J.C. & Yang, Q. 2008. The impact of misregistration on SRTM and DEM image differences. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2430-2442.
- Wood, S.N.; Pya, N. & Saefken, B. 2016. Smoothing parameter and model selection for general smooth models (with discussion). *Journal of the American Statistical Association*, 111: 1548-1575.
- Zar, J.H. 2010. *Biostatistical Analysis*. 5th Edition. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 944p.