

Artigo de Pesquisa

## Avaliação da acurácia vertical de Modelos Digitais de Elevação para mapeamento de ambientes glaciais e periglaciais da Península Keller, Antártica Marítima

*Vertical accuracy evaluation of Digital Elevation Models for mapping of glacial and periglacial environments on Keller Peninsula, Antarctica Marine*

Filipe Daros Idalino <sup>1</sup>, Kátia Kellem da Rosa <sup>2</sup>, Carina Petsch<sup>3</sup>, Cláudio Wilson Mendes Jr <sup>4</sup>, Cleiva Perondi <sup>5</sup>, Júlia Lorenz <sup>6</sup>, Norton Bushcer <sup>7</sup> e Jefferson Cardia Simões <sup>8</sup>.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. [filipe.idalino@ufrgs.br](mailto:filipe.idalino@ufrgs.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5587-5208>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. [katiakellem@gmail.com](mailto:katiakellem@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-9658>

<sup>3</sup> Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências, Santa Maria, Brasil. [carinapetsch@gmail.com](mailto:carinapetsch@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-0080>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. [claudio.mendes@ufrgs.br](mailto:claudio.mendes@ufrgs.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1745-348X>

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. [cleivaperondi@gmail.com](mailto:cleivaperondi@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-2721>

<sup>6</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. [julorens@gmail.com](mailto:julorens@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1695-1807>

<sup>7</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Centro de Educação Continuada, Porto Alegre, Brasil.  
[nortonbuscher@gmail.com](mailto:nortonbuscher@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3249-7181>

<sup>8</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. [jefferson.simoies@ufrgs.br](mailto:jefferson.simoies@ufrgs.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5555-3401>

Recebido: 01/09/2020; Aceito: 28/12/2020; Publicado: 10/04/2021

**Resumo:** O presente artigo analisa a acurácia vertical dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) TanDEM-X (TDX) e o Reference Elevation Model for Antarctica REMA2 e REMA8 e seu potencial no mapeamento de ambientes glaciais e periglaciais utilizando como estudo de caso a Península Keller (PK), localizada na Ilha Rei George (IRG), Antártica Marítima. A acurácia vertical dos modelos foi avaliada a partir de um MDE gerado por Fotogrametria, por meio do cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (doravante denominado como RMSE) para toda a área da Península e para três classes de superfície: área livre de gelo, lagos e geleiras. Para a análise estatística também foi realizado o cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (R) e da matriz de erro a partir dos valores de RMSE. O potencial dos MDEs para a análise geomorfológica foi avaliado com a aplicação do método Geomorphons para classificação automática de elementos do relevo glacial. Com um RMSE de 9,85 metros (m), o REMA8 apresentou melhores resultados. O TDX subestima as elevações em geral e o REMA2 superestima as maiores elevações. O TDX possui melhores valores de RMSE para as áreas livres de gelo (de 10,4 m) quando se desconsidera a classe de cobertura lacustre. Os 3 modelos apresentaram alto coeficiente de correlação. A classificação por Geomorphons, a partir do REMA2, mostrou melhores resultados no mapeamento de formas de relevo localizadas no ambiente paraglacial, identificando morainas, escarpas e terraços. As macroformas de erosão glacial chamadas arêtes foram melhores identificadas na classificação dos dados do REMA8 e do TDX. O REMA8 permitiu a classificação das feições de praias elevadas em quase toda a extensão costeira da Península e recomenda-se o seu uso para a identificação de paleoníveis

de linha de costa. A maior acurácia vertical auxilia na melhor identificação das formas de relevo glaciais. As diferenças de acurácia vertical entre os MDEs foram influenciadas pelas características superficiais do terreno e a configuração dos elementos do relevo.

**Palavras-chave:** Classificação Automática do Relevo; Geomorfologia Paraglacial; Sensoriamento Remoto da Criosfera.

**Abstract:** This paper analyzes the vertical accuracy and performance of Digital Elevation Models (DEMs) TanDEM-X (TDX) and Reference Elevation Model for Antarctica - REMA2 and REMA8 - and their potential for glacial and periglacial environments mapping using the Keller Peninsula (KP) as case study, located in King George Island (KGI), maritime Antarctica. The vertical accuracy of these models was evaluated using a DEM generated from photogrammetry by calculating the Root Mean Square Error (RMSE) for the entire area of the Peninsula and for three surface classes: ice-free, lakes and glaciers areas. The Pearson linear correlation coefficient (R) and error matrix from RMSE values were calculated by statistical analysis. The DEMs potential for geomorphological analysis was evaluated applying the Geomorphons method for automatic classification of glacial relief elements. With a RMSE of 9.85 m, the REMA8 shows the best results. The TDX underestimates the overall elevations and the REMA2 overestimates the highest elevations. The TDX produces the best RMSE values for ice-free areas class (10.4 m) when the lake coverage class is disregarded. In general, all models show a high correlation coefficient. The Geomorphons classification by REMA2 shows the best results in relief forms mapping located on paraglacial environments, for identifying moraines, scarps and terraces. The macroforms from glacial erosion were better identified in classification of REMA8 and TDX DEM. REMA8 allowed the classification of raised beaches features in almost all coastal extension of the Peninsula and its use is recommended for the coastline paleolevel identification. The vertical accuracy differences among models were influenced by terrain surface characteristics and relief elements configurations.

**Keywords:** Relief Automatic Classification; Paraglacial Geomorphology; Remote Sensing of the Cryosphere.

---

## 1. Introdução

A descrição da superfície da Terra por classificação automática constitui uma técnica importante para derivar relevantes informações da paisagem. Na Geomorfologia tem aplicações diversas, como na análise de fragilidade e suscetibilidade a movimentos de massa, a perda de solo, mapeamentos geomorfológicos, classificações dos tipos individuais de formas de relevo e estimativa da evolução pretérita das paisagens (BISHOP et al., 2012). Para isso, dados de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são utilizados em diferentes áreas no âmbito da Geografia e Geociências (VARGA; BAŠIĆ, 2015), especialmente para análises em regiões onde medidas em campo que, devido a questões políticas ou ambientais, são difíceis ou impossíveis (ARRAS et al., 2017).

Como exemplo de ambiente com as características descritas acima, para Antártica há diferentes fontes de informações topográficas e MDEs, e com resoluções espaciais distintas. Dentre os MDEs que abrangem esse continente, são muito utilizados o Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model v.2, o RAMPDEM, (LIU et al., 2001), com resolução espacial de 1 quilômetro (km), e o ASTER GDEM v.2, com resolução espacial de qualidade superior, de 30 metros (m). Como exemplo de MDEs globais recentes, existem o ALOS World 3D (TADONO et al., 2014; TAKAKU et al., 2016), gerado a partir de imagens do sensor Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) a bordo do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS), e o MDE ALOS-PALSAR em regiões superiores a 60°S (JAXA, 2020 – version1.0).

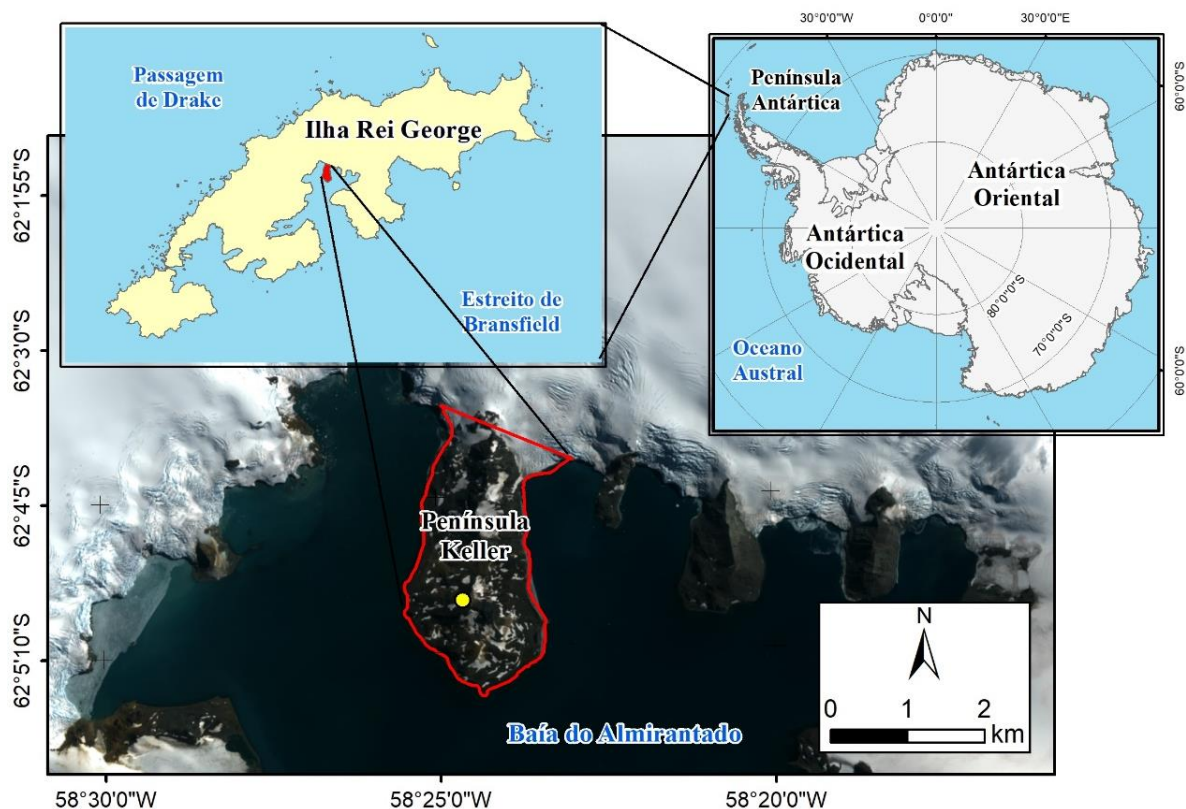
Quando se pretende realizar estudos para classificações das formas de relevo, é indicado que se utilizem MDEs de resolução entre 5 m e 30 m (ZHANG; MONTGOMERY, 1994; KIENZLE, 2004). Um MDE global que atende esse critério é o da missão TanDEM-X (TDX), coordenada pelo Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Centro Aeroespacial Alemão – que desde setembro de 2016 pode ser visto como um dos conjuntos de dados globais de elevação mais consistentes, altamente precisos e completos da superfície da Terra em operação (RIZZOLI et al., 2017; WESSEL et al., 2018). Em 2018, o Polar Geospatial Center (PGC) lançou o Reference Elevation Model for Antarctica 2 e 8 (REMA2 e REMA8), com resolução espacial de 2 m e 8 m, cobrindo quase todo o continente antártico (HOWAT et al., 2019). Cook et al. (2012) disponibilizaram um MDE para toda a Península Antártica, com 100 m de resolução espacial, derivado de metodologias de correção do ASTER GDEM. Esse MDE possui diferença média de elevação de -4 m e da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) de  $\pm 25$  m com relação a dados do ICESat, ao passo que os dados originais de elevação do ASTER GDEM v.2 possuem diferença média de -13 m e RMSE de  $\pm 97$  m.

Estudos sobre a estimativa da acurácia de dados de MDE locais e de escala regionais, como o caso de áreas específicas da Antártica, são fundamentais para o entendimento dos potenciais e limitações para diversas análises e mapeamentos (JING et al., 2014). A avaliação do erro vertical disponibilizada pela validação dos modelos globais pode ser considerada uma verificação global, pois ignora padrões espaciais dos erros e características locais do terreno, como aquelas relacionadas a altos gradientes topográficos ou a existência de perfis de vertentes mais curtos ou mais amplos (CHANDLER et al., 2018). A avaliação comparativa de MDEs disponíveis gratuitamente podem auxiliar na escolha de bancos de dados para estudos glaciológicos de análises futuras. Ressalta-se que a disponibilidade dos MDEs, bem como o rápido avanço no campo da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), oferece novas oportunidades na análise do relevo (CHENG; LEI, 2004).

Em vista disso, o objetivo deste artigo é avaliar a acurácia dos modelos TDX, REMA2 e REMA8 e seu potencial no mapeamento de feições deposicionais e erosivas de ambientes glaciais e paraglaciais na Península Keller (PK), localizada na Ilha Rei George (IRG), Antártica Marítima.

## 2. Área de Estudo

A PK está localizada entre as latitudes 62°03'S e 62°06'S e longitudes 58°23'O e 58°26'O (Figura 1), na baía do Almirantado, e a IRG, no arquipélago das Shetlands do Sul. Nessa região predominam litologias vulcânicas de composição variada, do final do Cretáceo e início do Terciário. Ocorrem acumulações detríticas de natureza variável e o relevo é formado por diversos tipos de feições, como níveis de terraços e morainas, depósitos de tálus e cristas rochosas (FRANCELINO et al., 2004; SCHAEFER et al., 2004). No geral, os solos são geralmente rasos e esqueléticos, compostos principalmente por Leptosolos<sup>1</sup> e Criossolos<sup>2</sup> (FRANCELINO et al., 2011).



**Figura 1.** Localização da Península Keller. Fonte: Elaboração própria, com dados do Quantarctica e uma imagem do Sentinel-2B de 19/01/2020 (Datum: WGS-1984, projeção Estereográfica Polar) da Agência Espacial Europeia (ESA). Morro Flagstaff (62°4'45''O, 58°24'40''S) indicado no mapa pelo ponto amarelo.

<sup>1</sup> Os Leptosolos são assemelhados aos Neossolos Litolíticos de perfil A/R do sistema Brasileiro de Classificação de solos. São solos com profundidade limitada por rocha dura contínua, dentro dos 25 cm iniciais. Estão presentes sobre as feições mais estáveis da área, como afloramentos de rocha e felsenmeer (FRANCELINO et al., 2004).

<sup>2</sup> Os Criossolos são caracterizados pela presença de material gélido e apresentam evidência de crioturbação e segregação por gelo. Solos com permafrost podem ser cimentados por gelo, o que é típico das regiões árticas ou, no caso de água intersticial insuficiente, podem ser secos como os desertos polares antárticos (BREMER, 2008).

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Dados

Foram utilizados recortes dos MDEs TDX, REMA2 e REMA8, e o MDE de referência Aerofotogramétrico da PK (Tabela 1). Ressalta-se que há diferentes tipos de sensores, métodos de geração e resoluções espaciais usados na aquisição dos dados de elevação, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados referentes aos MDEs: TDX e REMA2 e REMA8.

Dado	Tipo de sensor e Método de geração	Resolução Espacial	Acurácia Vertical	Sistemas de referência horizontal e vertical	Fonte
TDX	SAR - Interferometria	12 m	2,9 m	Datum WGS84	DLR, 2019
REMA2 Strip	Óptica - Diferença de paralaxe	2,2 m	3,5 m	Datum WGS84 – Antarctic Polar Stereographic	PGC, 2018
REMA8 Tiles	Óptica - Diferença de paralaxe	8,8 m	0,6 m	WGS84 – Antarctic Polar Stereographic	PGC, 2018
MDE de referência	Aerofotogrametria e dados de levantamento topográfico	0,6 m	0,8 m	Datum WGS84 – UTM	Mendes Jr. et al. (2010) e Rosa et al. (2014)

Dados o Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e do Polar Geospatial Center (PGC).

O TDX possui precisão relativa vertical de 2 m, acurácia vertical e horizontal absolutas de 10 m, e resolução espacial de 12 m, com dados para toda a IRG (BRAUN; SEEHAUS, 2016; WESSEL et al., 2018). Esses dados são gerados a partir de dados interferométricos obtidos dos satélites TerraSAR-X e TanDEM-X (DLR, 2019).

O REMA fornece o primeiro mapa de terreno de alta resolução espacial (2 m para o REMA2, e 8 m para REMA8) de quase todo o continente antártico. Este foi obtido com imagens estereoscópicas de resolução submétrica obtidas por satélites WorldView-1, 2 e 3, e dados do GeoEye-1, adquiridos entre 2009 e 2017, com a maior parte coletada em 2015 e 2016, durante as estações de verão austral. Cada MDE foi registrado verticalmente em nuvens de pontos de altimetria obtidas do radar Cryosat-2 e do ICESat1, com menos de 1 m de erro absoluto (HOWAT et al., 2019).

Para a análise da acurácia vertical dos MDEs foi utilizado o MDE Aerofotogramétrico obtido por Mendes Jr. et al. (2010) e Rosa et al. (2014), gerado a partir de um de par de fotografias aéreas verticais na escala 1:50.000, adquiridas em fevereiro de 2003 pelo Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada del Chile (SHOA). Na avaliação da acurácia desse modelo foram utilizadas coordenadas de pontos de controle, obtidos de uma planta topográfica da Estação Antártica Comandante Ferraz (FONSECA JR. et al., 2006), e dados de um levantamento por GPS realizado pelo método relativo estático rápido com receptores topográficos de simples frequência (GTRA e GTR1 da TOPCOM). Sobre o estereopar foram locados 72 pontos de controle altimétricos nessa linha de costa, além de 21 pontos de controle planimétricos e 198 pontos de passagem na área continental, e para avaliar a exatidão dos dados planimétricos, foram utilizados 6 pontos de checagem. No ajustamento por feixes perspectivos (LEICA GEOSYSTEMS, 2003), foi obtido um erro médio quadrático (EMQ) de 1,2 pixels (aproximadamente 0,76 m no terreno). A cota no cume do morro Flagstaff (62°4'45", 58°24'40" S), conhecido pelos brasileiros como morro da Cruz (Figura 1) apresenta diferença de apenas 0,3 m com relação ao levantamento topográfico de Battke (1990). A

metodologia completa para aquisição e avaliação do MDE de referência pode ser consultada em Mendes Jr. et al. (2010).

A etapa de processamento incluiu a comparação quantitativa dos MDEs e qualitativa das classes de superfície (HILTON et al., 2003; JING et al., 2014 e ARRAS et al., 2017). Todas as etapas metodológicas foram realizadas no software ArcGIS, da ESRI®, versão 10.3.1, disponibilizada pela Universidade (omitida para avaliação). Os dados dos MDEs foram projetados para a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), de acordo com o MDE de referência, a partir da ferramenta Project raster, com resolução espacial reamostrada para 12 m. Essa ferramenta projeta um conjunto de dados raster em uma nova referência espacial usando um método de aproximação de interpolação bilinear, que projeta os pixels em uma grade de malha grossa e usa interpolação bilinear entre eles. Imagens diferença foram geradas pelo Raster calculator tool para a análise pixel a pixel.

A análise da acurácia entre os MDEs foi realizada através do cálculo do RMSE, e a técnica de avaliação foi baseada em Alganci, Besol e Sertel (2018). Os autores extraem e comparam os RMSE entre MDEs de acordo com diferentes classes de superfície do solo. O RMSE é obtido com a Eq. (1) e considera o modelo referencial (ou considerado real).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z_t)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

onde  $Z_i$  é o valor altimétrico do MDE,  $Z_t$  é o valor do ponto de controle e  $n$  é o número total de pontos de controle.

Para a análise estatística foi realizada a avaliação dos erros altimétricos dos MDEs, calculando as estatísticas descritivas como altura mínima, média, máxima e desvio padrão para cada modelo, do cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (R) e da matriz de erro a partir dos valores de RMSE descritos anteriormente. Segundo Feijoo (2010), o coeficiente R é baseado em modelos de regressão linear e busca determinar o nível de associação entre as amostras. Esse coeficiente varia de +1 à -1, sendo +1 a correlação positiva perfeita e -1 a correlação negativa perfeita.

Verificou-se que havia diferenças espaciais na distribuição dos valores de elevação entre os MDEs. A avaliação espacial qualitativa dos erros e diferenças visíveis do terreno foi realizada com a observação de uma imagem do satélite Sentinel-2 (MSI), fotografias do campo tomadas no verão austral de 2011, com o ortofotomosaico e perfis topográficos. Com isso, foi realizado o agrupamento de classes para análise dos alvos de interesse na área de estudo por meio de interpretação visual desses dados e foram classificadas áreas livres de neve e gelo (i.e., que possuem cobertura sedimentar, rochosa, áreas livres de gelo e declividades de até 8%), áreas com cobertura de neve/gelo e com lago. A partir disso, realizou-se o cálculo do RMSE e o coeficiente de correlação entre os recortes dos MDEs para cada classe analisada, e foi calculada uma nova matriz de erro para essa análise.

Também foi aplicada uma classificação automática de formas de relevo baseada no método Geomorphons (JASIEWICZ; STĘPIŃSKI, 2013) e na Classificação Digital Revisada por Elementos de Geomorphons (Revised Geomorphons Digital Classification – RGDC) de acordo com Petsch et al. (2020), para avaliar de forma qualitativa os produtos gerados pelos MDEs avaliados. O processamento de cada um dos MDEs foi feito através do aplicativo Geomorphons-App. Os autores Jasiewicz e Stępiński (2013) ressaltam que esse método utiliza a similaridade de textura do MDE, que apresenta variação de níveis de cinza em relação às células vizinhas. Para este cálculo, os perfis foram definidos para as direções principais da célula central extraída do MDE. O método apresenta dois parâmetros livres, o lookup que representa a distância em metros ou unidades de célula e o threshold que se refere ao nivelamento em graus. Os valores utilizados para o lookup foi de 20 pixels e threshold foi de 2 graus, assim como foi utilizado por Petsch et al. (2020), que comparou os MDEs SRTMGL 1 e ALOS PALSAR, para a análise de formas glaciais na Cordilheira Blanca, Peru.

As classes delimitadas foram adaptadas de Petsch et al. (2020) para o contexto da PK: plano (planícies glaciofluviais provenientes da retração da geleira ou de derretimento da neve), pico (horns), crista (podem ser arêtes ou morainas), ressaltos (plataformas marinhas), crista secundária (arêtes), encosta (encostas), escavado (vales em circo), base de encosta (praias elevadas), vales, e fosso (lagos e alagados).

## 4. Resultados

### 4.1. Análise do RMSE em metros

O REMA2 e o REMA8 apresentam valores de RMSE menores, de 22,08 m e 9,85 m, respectivamente (Tabela 2). A análise do RMSE e o coeficiente de correlação entre os MDEs evidenciaram que o REMA8 tem melhor acurácia vertical do que o REMA2 na PK, mesmo ambos sendo obtidos a partir de imagens ópticas (Tabela 2). Entre os modelos utilizados, o REMA8 também foi o que mais se aproximou do MDE de referência, considerando os valores de erro mínimo, médio e máximo, enquanto que o REMA2 se aproximou nos valores de R e desvio-padrão (Tabela 2). Os 3 modelos apresentaram alto coeficiente de correlação (Tabela 2).

**Tabela 2.** Matriz de erro comparativa entre os MDEs referencial (Fotogramétrico), TDX, REMA2 e REMA8.

MDE	Min.	Máx.	Desvio-padrão	Média	RMSE	R
MDE de referência	0	330,43	74,80	97,1	0	1
TDX	-7,88	316,19	65,42	107,79	32,59	0,92
REMA2	18,21	354,61	74,35	118,75	22,28	0,97
REMA8	-2,26	327,61	74,10	92,751	9,85	0,95

De forma geral, para a área da PK, os valores de elevação do TDX foram os mais diferentes do MDE Aerofotogramétrico, com RMSE de 32,59 m (Tabela 2). No entanto, quando se considera os valores em m para o RMSE de áreas livres de gelo há uma diminuição do RMSE do TDX para 10,44 m. A melhor acurácia vertical de áreas livres de gelo foi encontrada para o REMA8, com 1,41 m (Tabela 3).

Na identificação dos valores de RMSE das classes de superfície do terreno lacustre, observaram-se maiores erros nos ambientes aquosos, onde as diferenças entre o maior índice de 21,75 m para o REMA2 e o menor índice de 3,35 m do REMA8, apresentaram uma variação de 18,4 m no erro total, quando comparada às áreas livres de gelo. O TDX apresentou um valor aproximado do REMA2, com 20,74 m (Tabela 5). Os alvos de geleiras tiveram menor RMSE entre os MDEs, sendo de 13,31 m para o REMA8, 11,52 m para o REMA2 e 10,44 m para o TDX (Tabela 3).

**Tabela 3.** Matriz de erro comparativa entre o TDX, REMA2 e o REMA8 de acordo com as superfícies do terreno lacustre, área exposta com cobertura sedimentar e geleira (setores de declividades entre 0-8%).

MDE	RMSE Lago	RMSE Área Exposta	RMSE Geleira
TDX	20,74	10,44	10,44
REMA2	21,75	3,4	11,52
REMA8	3,35	1,41	13,31

### 4.2. Aplicação do método Geomorphons para classificação automática da área

Entre as feições que foram classificadas do relevo da PK a partir dos MDEs avaliados, predominaram encostas, arêtes e vales em circo (Figura 2). Tecendo uma breve comparação entre os MDEs e sua performance em relação a cada uma das formas, têm-se que para os vales em circo, o método de Geomorphons mostrou resultados mais próximos do REMA8 com relação aos obtidos com o MDE Aerofotogramétrico (Figura 2). Quanto a feição de arêtes, esta foi semelhante à gerada pelo MDE Aerofotogramétrico, tendo como base qualquer um dos três MDEs avaliados neste estudo. Para os vales, os MDEs REMA2 e REMA8 apresentam resultados significativos comparando com esse MDE referencial (Figura 2). O REMA8 permitiu a classificação das feições de praias

elevadas em quase toda a extensão costeira da ilha, o que não ocorreu ou apresentou resultados inferiores no REMA2 e TDX. O horn da área de estudo não foi identificado no REMA2 (Figura 2).

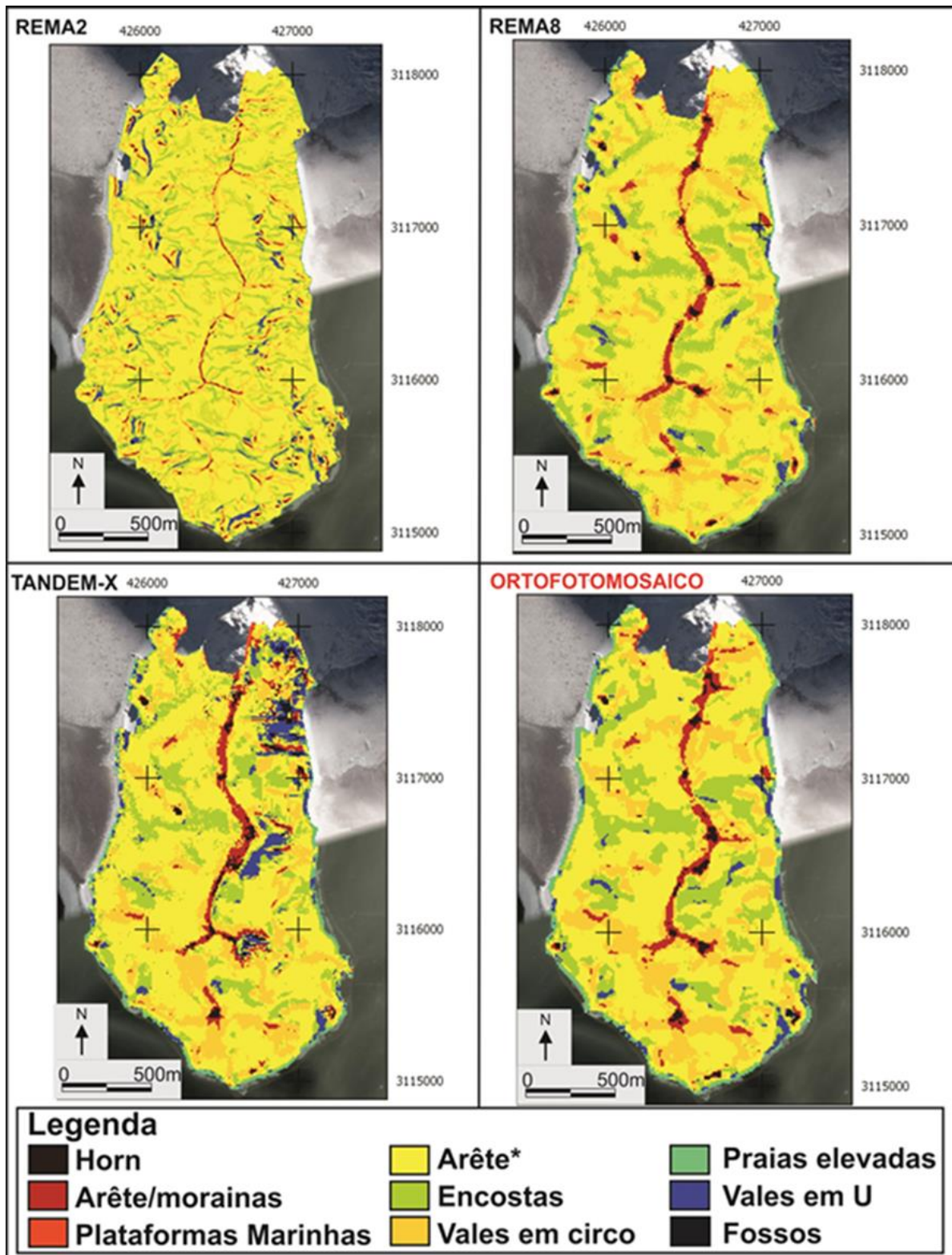


Figura 2. Aplicação do método de Geomorphons para classificação das formas de relevo da PK.

Os perfis transversais da PK (Figura 3) mostram como a diferença de acurácia vertical e resolução espacial entre os modelos repercute no resultado da delimitação das formas pelo método Geomorphons. De maneira geral, salienta-se que ocorrem processos de retinização ou suavização do relevo nos perfis topográficos e há mudanças quanto as formas classificadas, quando se utiliza cada um dos MDEs utilizados nesta pesquisa (Figura 3).

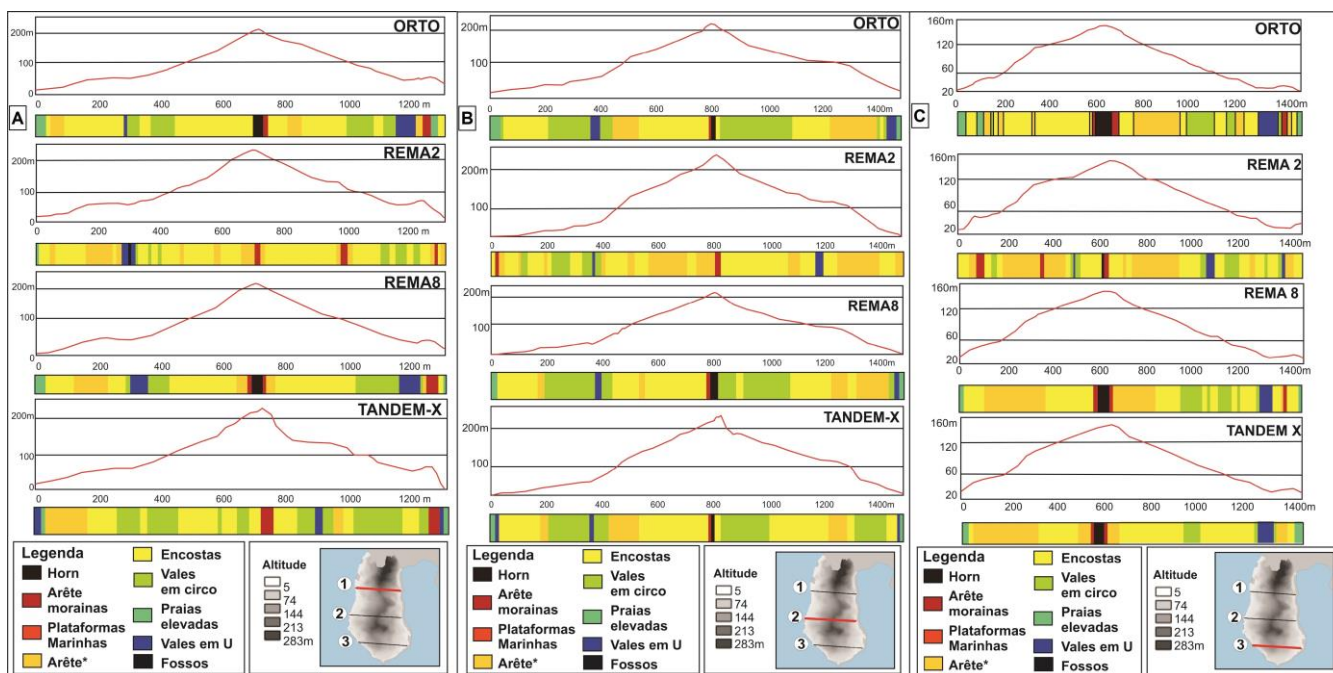


Figura 3. Perfis topográficos gerados em áreas representativas das formas.

No perfil 1, é possível visualizar uma moraina latero-frontal, sendo classificada como arête, e no perfil 2 há três morainas classificadas como cristas secundárias (Figura 3A). Os dois primeiros perfis transversais mostram áreas significativas quanto à diversidade das formas da PK, onde predominam encostas (Figuras 3A e 3B), em detrimento de formas erosivas como vales em circo, cristas e horns. O perfil 3 (Figura 3C) apresenta a predominância de áreas de encostas e de arêtes, em uma região de menor elevação. O perfil 1, gerado a partir do MDE do REMA2 (Figura 3A), apresenta-se mais suavizado, embora mostre vales com um possível grau de entalhamento maior que nos demais MDEs.

### 5. Discussão

Os valores de RMSE variaram conforme distintas características superficiais da área de estudo. A melhor acurácia vertical dos dados de elevação das áreas livres de gelo, sem corpos de água, foi encontrada no REMA8. No entanto, ao comparar a matriz de erro, verifica-se que o TDX subestima as elevações e o REMA2 superestima as maiores elevações. O TDX possui melhores valores de RMSE (10,4 m) nas áreas livres de gelo planas quando se desconsidera a classe de cobertura lacustre. O resultado para o TDX pode ser comparado ao encontrado por outros estudos que mostram uma alta acurácia do MDE em alguns setores do terreno (PIPAUD; LOIBL; LEHMKUHL, 2015; PASQUETTI; BINI; CIAMPALINI, 2019).

Nos ambientes aquosos, o REMA2 e o REMA8 apresentaram uma alta variação no RMSE, quando comparada às áreas livres de gelo com solo (sedimento, solo ou rocha exposta). Os valores de elevação mínima (-7,88) do TDX estão relacionadas a área de cobertura lacustre, assim como os maiores valores de RMSE devido as diferentes interações do sinal de radar com a superfície líquida.

Conforme apresentado no item de “resultados” ocorrem variações quanto as feições mapeadas utilizando o método RGDC (PETSCH et al., 2020), considerando como base topográfica cada um dos três MDEs. Nesse sentido, ao se realizar uma classificação automática das formas de relevo de um ambiente, é necessário explorar diferentes produtos de elevação, de acordo com sua resolução espacial e vertical e o objetivo da pesquisa. Nessa perspectiva, algumas discussões são válidas. Para os setores de alta declividade que envolvem as feições de arête em torno dos horn, o REMA8 demonstrou os melhores resultados, pois apresentou uma área próxima daquela apresentada pela classificação do MDE do aerolevantamento. Enquanto, o REMA2 apresentou superestimação de toda feição de arête central. Ressalta-se que as áreas de horns não foram mapeadas em nenhum dos perfis gerados a partir do REMA2, além disso, esse MDE apresentou maiores erros na identificação de encostas, vales em circo, vales e cristas secundárias devido a menor acurácia vertical. Deng et al. (2007) relacionaram a forte variação de declividade do relevo a uma maior sensibilidade para mudanças nas resoluções espaciais dos MDEs globais.



Salienta-se que a acurácia vertical encontrada nos setores íngremes (RMSE:  $\pm 6,1$  m) são incompatíveis com a acurácia de  $\pm 0,6$  m divulgadas na validação destes produtos (PGC, 2018). Ainda nesse sentido, Cook et al. (2012) verificaram também baixa acurácia vertical (RMSE =  $\pm 25$  m) nas áreas de picos e declives acentuados no MDE gerado para a Península Antártica (100 m de resolução espacial), e em áreas de montanhas íngremes da Antártica (RMSE de  $\pm 97$  m).

Ainda no que se refere ao REMA2, e seu desempenho inferior em áreas de maior declividade, isso se deve porque o método Geomorphons se baseia nas direções principais da célula central. Por exemplo, o horn, caracterizado como uma feição piramidal resultante da ação erosiva de geleiras em sua volta, não foi mapeado com o REMA2, visto que as células centrais (pixel de 2,2 m) não foram adequadas para identificar essa forma, que demanda resolução espacial maior que 2 metros para que possa ser identificado. O REMA8, como já indicado no cálculo do RMSE, de fato apresentou o melhor resultado na classificação de formas de feições, em especial para vales em circo, arêtes, horns e vales em U.

Especificamente quanto a classe de arêtes, o TDX mostrou-se mais adequado para a identificação deste elemento do relevo. A aplicação de múltiplos interferogramas exibindo linhas de base perpendiculares na geração do TDX, aparentemente diminuiu a suscetibilidade do produto em apresentar artefatos que prejudicassem a interpretação geomorfológica da classe de arêtes pelo método Geomorphons para a área de estudo. De acordo com Pipaud, Loibl e Lehmkuhl (2015), diferente de alguns outros MDEs com um alto efeito de sombreamento de radar e encurtamento de rampa, é esperado que, provavelmente, diversos problemas no TDX tenham sido superados como, por exemplo, as encostas íngremes voltadas para o sensor de radar, as encostas de sotavento, superfícies de corpos d'água e áreas de fortes contrastes topográficos.

Os problemas ao usar o TDX, no que se refere a identificação das classes de vales e terraços, podem estar relacionados a sua menor acurácia vertical e resolução espacial quando comparado aos demais, principalmente quando se considera áreas livres de gelo e planícies. Apesar da sua configuração biestática, alguns trabalhos mencionam problemas com a precisão do TDX em áreas com inclinações maiores que  $10^\circ$ , como Wessel et al. (2018), Hawker, Neal e Bates (2019) e de Gonzáles-Moradas e Viveen (2020). O TDX apresentou uma ligeira superestimação do terreno em alguns locais irregulares, o que também foi descrito por Gdulová, Maresová e Moudrý (2020).

Ainda que o efeito de sombreamento, comumente mencionado em dados de radar e associado às áreas mais íngremes, esse também pode interferir na acurácia vertical de MDEs gerados por dados de aquisição óptica (WESSEL et al., 2018). Contudo, os modelos REMA2 e REMA8 apresentam menores erros de elevação com relação ao MDE Aerofotogramétrico nas feições analisadas. No que se refere a classe de praias elevadas, o REMA8 foi o que melhor permitiu a classificação destas feições em quase toda a extensão costeira da PK, e recomenda-se o seu uso para a identificação de paleoníveis de linha de costa, já que o TDX apresentou dificuldades na classificação nessas porções da área de estudo. A inconsistência para o mapeamento destas áreas susceptíveis a variação da maré ao usar TDX também é indicada nos estudos de Pasquetti, Bini e Ciampalini (2019) ao analisar a Patagônia.

Os perfis transversais do terreno auxiliaram a entender como a acurácia vertical e resolução espacial dos MDEs refletiram na delimitação das formas do relevo, analisado pelo método de RGDC (PETSCH et al., 2020). De maneira geral, salienta-se que ocorreram processos de retificação ou de suavização do relevo nos perfis topográficos. Essa suavização refletiu a generalização da classificação, com ausência de formas mapeadas, comparando com o perfil gerado a partir do MDE Aerofotogramétrico. No que se refere ao REMA2, ressalta-se que este foi satisfatório para o mapeamento de morainas localizadas na média vertente, nas áreas entre o mar e o término dos vales em circo. A classificação das morainas é essencial para o entendimento do ritmo temporal de retração das geleiras das áreas de estudo.

Enquanto o REMA2 classificou as formas de relevo com maior detalhe, o REMA8 por sua vez também generalizou o relevo e deixou as vertentes em formato mais retilíneo, principalmente no perfil 2 (Figura 3B). Isso implicou em algumas mudanças abruptas no perfil, que podem ser observadas nas áreas de vales em circo, encostas e cristas secundárias mapeadas.

O TDX apresentou um perfil transversal ainda mais retilíneo do que o REMA8, com algumas porções que remetem a feições de chapadas. Para o perfil 1, o TDX demonstra quebras no relevo, o que configura uma alternância entre vales em circo, encostas e cristas secundárias. Para o perfil 2, observou-se maior declividade na área de horns e arêtes, deixando essas feições com área subestimada. No perfil 3, o TDX mostrou processos de retificação nas áreas de encostas ainda mais evidentes e de suavização nas áreas de transição dos tipos de relevo.

Verificou-se também uma superestimação da área de talvegues, caracterizado pelo aprofundamento nas áreas de vale em U, ou de menor elevação.

Após os resultados apresentados, é possível inferir que há diferenças significativas quanto a elevação dos MDEs em relação à verdade de terreno, obtida por aerofotogrametria. Na avaliação do potencial de cada um desses produtos cartográficos para o contexto do relevo glacial da PK, através dos resultados da aplicação e do método de Geomorphons (Figura 2) e revisão da proposta de classificação automática da área (RGDC), é possível relacionar as repercussões das diferenças de elevação entre os MDEs analisados.

Dessa forma, diante dos dados e discussões apresentadas, a maior resolução espacial dos MDEs Aerofotogramétrico, REMA2 e REMA8 e acurácia vertical possibilitou maior detalhamento da rugosidade do terreno e maior distinção de limiares de declividade quando há feições de menor dimensão, o que também determina variações nos produtos geomorfométricos e na identificação das formas de relevo. Nesse sentido, validando este estudo em relação à outras pesquisas, Deng et al. (2007) compararam resoluções espaciais de MDEs de igual acurácia vertical e encontraram que os atributos geomorfométricos do relevo respondem à mudança de resolução de diferentes formas, especialmente quando se comparam resoluções espaciais entre 5 e 50 m. A maior sensibilidade foi encontrada para os produtos de curvatura horizontal e vertical, enquanto o produto de declividade mostrou-se menos sensitivo. Smith e Pain (2009) afirmaram que o produto declividade do terreno propaga amplamente o erro vertical do MDE original. Resumindo, a maior acurácia vertical do REMA8 resultou na verificação mais detalhada de limiares de declividade do relevo, quando comparado ao REMA2, que possui maior resolução espacial.

Por fim, além de realizar a classificação e mapeamento das feições, se faz fundamental sua análise e interpretação do ambiente de retração das geleiras. Entre as feições que foram classificadas pelo método de Geomorphons (JASIEWICZ; STĘPIŃSKI, 2013; PETSCH et al., 2020) no relevo da PK e sua interpretação ambiental, as encostas referem-se a escarpas e depósitos de tálus e as cristas referem-se a um arête, que dividia o fluxo das geleiras para leste e oeste, no passado, e que abriga uma série de vales em circo. Simões et al. (2004) apontaram que as geleiras dessas áreas eram pequenas, sem conexão com o campo de gelo principal da IRG e estavam próximas do ponto de fusão do gelo. Sendo assim, essas formas erosivas foram atribuídas a um passado onde as massas de gelo da área possuíam significativo maior volume, possivelmente alimentada pelo campo de gelo da IRG, permitindo esculpir esses vales e depressões.

Dentro da classe de arêtes identificaram-se algumas cristas morânicas (Figura 2), considerando o REMA2, com resolução espacial de 2 m. Ressalta-se que na porção mais meridional da PK foi possível identificar uma sequência de cristas secundárias latero-frontais, indicativas da movimentação da frente da geleira no Holoceno. Algumas dessas morainas marcaram um novo avanço das geleiras, que ocorreu por volta de 740 anos (BIRKENMAJER, 1979), e também do avanço das geleiras durante a Pequena Idade do Gelo. Nesse sentido, somente o MDE REMA2 identificou essas morainas (Figura 2).

Os vales em U, comumente observados na península Fildes (PETSCH et al., 2019), ocupam na PK somente pequenas porções da área livre de gelo, ao sul e correspondem a vales formados entre as morainas latero-frontais. Na Península Fildes, por exemplo, estes vales possuem maior distância entre os interflúvios, provavelmente devido à maior espessura de gelo e capacidade erosiva dessas geleiras. Sendo assim, o uso dos MDEs e da classificação das formas também pode guiar estudos de evolução da paisagem nas áreas livres de gelo.

## 6. Conclusões

Os dados desta pesquisa apontam que as diferenças de acurácia vertical entre os MDEs foram influenciadas pelas características superficiais do terreno e a configuração dos elementos do relevo. O estudo comparativo da acurácia dos MDEs analisados mostrou que os três modelos apresentaram alto coeficiente de correlação, no entanto, ressalta-se que o REMA8 teve os menores erros de RMSE para as áreas de menor elevação, visto que possui maior aproximação dos valores de elevação do MDE aerofotogramétrico. Assim, o REMA8 apresentou melhor acurácia em áreas de maior altitude e declividade, assim como em áreas de menor altitude, quando comparado aos demais avaliados neste estudo.

O TDX, apesar de ser gerado por técnica de interferometria biestática, apresentou diferenças de acurácia vertical quando comparado aos demais e problemas na identificação de alguns elementos do relevo. As características superficiais, como o tipo do alvo (neve/gelo, cobertura sedimentar ou lacustre) e os problemas com o encurtamento de rampa e o sombreamento radar para a análise geomorfológica em setores de declividade

podem ser avaliados em futuros estudos que considerem dados de identificação das formas de relevo em campo e de pontos de controle. A utilização de um MDE de referência obtido por outros métodos pode levar a uma melhor avaliação das diferenças nas acurácias verticais de MDEs disponíveis em função da característica dos ambientes, assim como na aplicação destes na classificação automática do relevo.

O modelo REMA2, apesar de apresentar a melhor resolução espacial e permitir o mapeamento de feições com dimensões menores, como morainas de avanço, ainda apresentou erros na classificação de Geomorphons com relação aos derivados do MDE Aerofotogramétrico, nas classes de encostas, vales em circo e cristas secundárias, principalmente nas médias vertentes. Além disso, não delimitou áreas de horns e subestimou as de arêtes. Por outro lado, a maior acurácia vertical auxilia na melhor identificação das formas de relevo glaciais, conforme observado para o REMA8, que permitiu a classificação das feições de praias elevadas em quase toda a extensão costeira da Península e recomenda-se o seu uso para a identificação de paleoníveis de linha de costa.

Quando se considera as macroformas de erosão glacial chamadas arêtes, estas foram melhores identificadas na classificação dos dados do REMA8 e do TDX. O reconhecimento de feições como topo íngreme e cristas (horns e arêtes) foi mais facilmente obtido com os dados do REMA8. O mapeamento destas feições erosivas poderá ser utilizado na compartimentação geomorfológica, visando a reconstrução paleoglaciológica e ainda em análises temporais de modificação da paisagem paraglacial. O REMA8 foi o que apresentou melhor representação em relação à classificação utilizando o MDE de referência, embora nos perfis analisados seja possível verificar a retificação do relevo, e perda de informações de classes. A maior acurácia vertical do REMA8 auxilia na melhor identificação das formas de relevo glaciais.

Por fim, a classificação de formas de relevo gerada pelo método de Geomorphons pode ser utilizada na elaboração de mapeamentos geomorfológicos, na reconstrução paleoglaciológica e ainda em análises temporais de modificação da paisagem paraglacial. No entanto, as características geomorfométricas da área de estudo influenciaram nos resultados de acurácia vertical e limitam o potencial para diversos estudos geomorfológicos nas áreas livres de gelo. A avaliação dos MDEs pode dar suporte para a análise e escolha do melhor dado disponível para cada proposta de estudo. No mapeamento de feições erosivas glaciais de macroescala não se verifica a necessidade de resoluções espaciais e acurácia vertical maiores do que o TDX, mas no mapeamento de feições de relevo deposicionais glaciais de mesoescala e microescala (menores que 3 m de extensão), como cristas morânicas de recessão, flutings, ou mesmo fendas superficiais nas geleiras, há a necessidade de MDEs com maior detalhamento espacial e acurácia vertical do que o REMA2 e REMA8. A relação temporal entre os MDEs também é um fator determinante na escolha entre os MDEs disponíveis para uma determinada área, por exemplo, no mapeamento de feições supraglaciais.

**Contribuições dos Autores:** Para o referido artigo, a participação dos autores foi dividida na forma descrita a seguir. Quanto à concepção do artigo: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa; quanto à pesquisa, escolha e teste da metodologia a ser executada: Kátia Kellem da Rosa, Cláudio Wilson Mendes Jr. Carina Petsch e Filipe Daros Idalino; na utilização de software: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch e Cláudio Wilson Mendes Jr; no processo de validação: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch, Cláudio Wilson Mendes Jr, Cleiva Perondi, Júlia Lorenz, Norton Bushcer; no que tange da análise formal: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Cláudio Wilson Mendes Jr, Júlia Lorenz, Jefferson Cardia Simões; no que diz respeito à pesquisa: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch, Cláudio Wilson Mendes Jr, Cleiva Perondi, Júlia Lorenz, Norton Bushcer; quanto aos recursos utilizados: Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch, Cláudio Wilson Mendes Jr. e Jefferson Cardia Simões; quanto à preparação de dados: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch, Cláudio Wilson Mendes Jr, Cleiva Perondi, Júlia Lorenz, Norton Bushcer; na escrita do artigo: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch, Cláudio Wilson Mendes Jr, Cleiva Perondi, Júlia Lorenz, Norton Bushcer; da revisão textual: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Carina Petsch e Cláudio Wilson Mendes Jr.; quanto à supervisão da construção do artigo: Kátia Kellem da Rosa, Cláudio Wilson Mendes Jr. e Jefferson Cardia Simões; quanto à aquisição de financiamento: Kátia Kellem da Rosa, Cláudio Wilson Mendes Jr. e Jefferson Cardia Simões. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** A realização desta pesquisa foi possível através de recursos e materiais do Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – (por 6 meses de bolsa auxílio, processo de número: 88887.360934/2019-00), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – (pela infraestrutura fornecida), do Programa de Pós-Graduação em Geografia - POSGEA-UFRGS – (pela vaga no curso de Doutorado fornecida) e do Centro Polar e Climático – CPC – (pelos recursos tecnológicos, materiais e o espaço disponível).

**Agradecimentos:** À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Ao Centro Polar e Climático (CPC). Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) – UFRGS.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

## Referências

1. ALGANCI, U.; BESOL, B.; SERTEL, E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. **International Journal of Geo-Information**, v. 73, n. 114, p. 1-16, 2018. DOI: 10.3390/ijgi7030114.
2. ARRAS, C.; MELIS, M. T.; AFRASINEI, G. M.; BUTTAU, C.; CARLETTI, A.; GHIGLIERI, G. Evaluation and Validation of SRTMGL1 and ASTER GDEM2 for Two Maghreb Regions (Biskra, Algeria and Medenine, Tunisia). In OUESSAR, M.; GABRIELS, D.; TSUNEKAWA, A.; EVETT, S. (eds.) **Water and Land Security in Drylands**. 1ª Ed. Springer, Cham., 2017. p. 291-301. DOI: doi.org/10.1007/978-3-319-54021-4\_24.
3. BATTKKE, Z. **Admiralty Bay, King George Island. Map, 1:50.000**. Warsaw: Nakladem Instytutu Ekologii, PAN, 1990.
4. BIRKENMAJER K. Lichenometric dating of raised marine beaches at Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). **Bull Polish Acad Sci – Earth**, v. 29, p. 119-127, 1979.
5. BISHOP, M. P.; JAMES, A. L.; SHRODER JR.; J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, v. 137, p. 5-26, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.06.027.
6. BRAUM, M. H.; BETSCH, T.; SEEHAUS, T. **King George Island TanDEM-X DEM, link to 470 GeoTIFF**. Institut für Geographie, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen471 Nürnberg, PANGAEA. 2016. DOI: 10.1594/PANGAEA.863567.
7. BREMER, U. F. **Solos e geomorfologia do leste da Península Warszewa, Ilha Rei George, Antártica marítima**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2008. 136p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/30989>.
8. CHENG, K.; LEI, T. C. Reservoir trophic state evaluation using Landsat TM images. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1321-1334, 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03642.x
9. CHANDLER, B. M. P.; LOVELL, H.; BOSTON, C. M.; LUKAS, S.; BARR, I. D.; BENEDIKTSSON, Í. Ö.; BENN, .D. I.; CLARK, C. D.; DARVILL, C. M.; EVANS, D. J. A.; EWERTOWSKI, M. W.; LOIBL, D.; MARGOLD, M.; OTTO, JAN-C.; ROBERTS, D. H.; STOKES, C. R.; STORRAR, R. D.; STROEVEN, A. P. Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 806 846, 2018. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.07.015.
10. COOK, A. J.; MURRAY, T.; LUCKMAN, A.; VAUGHAN, D. G.; BARRAND, N. E. A new 100-m Digital Elevation Model of the Antarctic Peninsula derived from ASTER Global DEM: methods and accuracy assessment. **Earth System Science Data**, v. 4, p. 129-142, 2012. DOI: 10.5194/essd-4-129-2012.
11. DENG, Y.; WILSON, J. P.; BAUER, B. O. DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. **International Journal of Geographical Information Science**, 21, 187 213, 2007. DOI: 10.1080/13658810600894364.
12. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (German Aerospace Center). **TerraSAR X, Germany's radar eye in space**. Disponível em: [www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565\\_read-436/#gallery/350](http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#gallery/350). Acesso em: 29/06/2019.
13. ESA - European Space Agency. **Sentinel-2B MSI**, de 19/01/2020. Identificador: S2B\_MSIL1C\_20200119T131859\_N0208\_R095\_T21EVM\_20200119T142732. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>>. Acesso em: 19 jan 2020.
14. FEIJOO, A. M. L. C. Correlação. In FEIJOO, A. M. L. C. **A pesquisa e a estatística na psicologia da educação**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, p. 109, 2010. ISBN: 978-85-7982-048-9.
15. FONSECA, JR.; E.S.; ERWES, H. J. B.; FAZAN, J. A.; SASSAKI, A. S. A.; CORREIA, E. Levantamento topográfico plani-altimétrico da Estação Antártica Comandante Ferraz. In: XIV Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica, 14., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CPA. 2006. p. 111-112.
16. FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER C. E. G. R.; FERNANDES E. I. F.; ALBUQUERQUE, M. R. F.; SIMAS, F. N. B.; MOREIRA, G. F. Geoformas da Península Keller, Antártica Marítima: subsídios ao monitoramento ambiental. In: SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. (Eds.) **Ecosistemas costeiros e monitoramento Ambiental da Antártica Marítima**. 1ª Ed. Viçosa: NEPUT, 2014. p. 15-25.

17. FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C.; SIMAS, F.; FILHO, E.; SOUZA, J.; COSTA, L. Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Catena*, v. 85, n. 3, p. 194-204, 2011. Disponível em: DOI: 10.1016/j.catena.2010.12.007.
18. GDULOVÁ, K.; MAREŠOVÁ, J.; MOUDRÝ, V. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sensing of Environment*, v. 241, n. 111724, p. 15, 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111724.
19. GONZÁLEZ-MORADAS, Maria del Rosario; VIVEEN, Willem. Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. *Remote Sensing of Environment*, v. 237, n. 111509, p. 19, 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111509
20. HAWKER, L.; NEAL, J.; BATES, P. Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sensing of Environment*, v. 232, n. 111319, 15 p, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111319.
21. HILTON, R. D.; FEATHERSTONE, W. E.; BERRY, P. A. M.; JOHNSON, C. P. D.; KIRBY, J. F. Comparison of digital elevation models over Australia and external validation using ERS 1 satellite radar altimetry. *Australian Journal of Earth Science*, v. 50, p. 157-168, 2003. DOI: 10.1046/j.1440-0952.2003.00982.x.
22. HOWAT, I. M.; PORTER, C.; SMITH, B. E.; NOH, M. J.; MORIN, P. The Reference Elevation Model of Antarctica. *The Cryosphere*, v. 13, p. 665-674, 2019. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.
23. JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, v. 182, n. 15, p. 147–156, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005.
24. JAXA. **ALOS Reserach and Application Project of EORC**, 2020. Disponível em: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>. Acesso em: 20/07/2020.
25. JING, C.; SHORTRIDGE, A.; LIN, S.; WU, J. Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China. *International Journal of Digital Earth*, v. 7, p. 969–992, 2014. DOI: 10.1080/17538947.2013.807307.
26. KÄÄB, A.; TREICHLER, D.; NUTH, C.; BERTHIER, E. Brief Communication: Contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya. *Cryosphere*, v. 9, n. 2, p. 557-564, 2015. Doi: doi:10.5194/tc-9-557-2015.
27. LEICA GEOSYSTEMS. **Leica Photogrammetry Suite OrthoBASE & OrthoBASE Pro**. User's guide.Georgia, Leica Geosystems, 2003. 516 p.
28. KIENZLE, S. The Effect of DEM Raster Resolution on First Order, Second Order and Compound Terrain Derivatives. *Transactions in GIS*, v. 8, n. 1, p. 83-111, 2004. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2004.00169.x.
29. LIU, H.; KC, J.; LI, B.; ZHAO, Z. **Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 [1 km DEM]**. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2001. Digital Media.
30. MENDES, JR.; C. W.; DANI, N.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; FONSECA JR.; E. S.; ERWES, H. J. B. Análise morfométrica da Península Keller, Antártica, através do SIG. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 62, n. 4, p. 571-582, 2010.
31. PASQUETTI, F.; BINI, M.; CIAMPALINI, A. Accuracy of the TanDEM-X Digital Elevation Model for Coastal Geomorphological Studies in Patagonia (South Argentina). *Remote Sensing*, v. 11, n. 1767, p. 13, 2019. DOI: 10.3390/rs11151767.
32. PETSCH, C.; COSTA, M. R.; ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Geomorfologia glacial e contexto paleoglaciológico da Península Fildes, Ilha Rei George, Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 4, p. 795-809, 2019. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1480>.
33. PETSCH, C.; ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; ROSA, K. K.; FIGUEIREDO, A. R.; SIMÕES, J. C. O Uso de Métodos de Mapeamento Automático de Relevô para análise de Formas Glaciais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 2, p. 253-269, 2020. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1771>.
34. PIPAUD, I.; LOIBL, D.; LEHMKUHL, F. Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments—A case study from SE Tibet, China. *Geomorphology*, v. 246, p. 232-254. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.025>.
35. PGC – Polar Geospatial Center. **REMA user documentation**. Disponível em: <<https://www.pgc.umn.edu/data/rema/>>. Acesso em: 29/07/2019.
36. RIZZOLI, P.; MARTONE, M.; GONZALEZ, C.; WECKLICH, C.; TRIDON, D. B.; BRÄUTIGAM, B.; BACHMANN, M.; SCHULZE, D.; FRITZ, T.; HUBER, M.; WESSEL, B.; KRIEGER, G.; ZINK, M.; MOREIRA, A. Generation and performance assessment of the global TanDEM X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 132, p. 119-139, 2017. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008.

37. ROSA, K. K.; MENDES JR.; C. W.; VIEIRA, R.; DANI, N.; SIMÕES, J. C. Análise morfométrica do setor norte da Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica. **Boletim de Geografia**, v. 32, p. 52-61, 2014. <http://dx.doi.org/10.4025/bolgeogr.v32i1.18710>.
38. SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE, M. R. F.; MICHEL, R. F. M.; VIANA, J. H. M.; TATUR, A. Fosfatização: Processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. (Eds.) **Ecosistemas costeiros e monitoramento Ambiental da Antártica Marítima**. 1ª Ed. Viçosa: NEPUT, 2014. p. 47-59.
39. SIMÕES, J. C.; DANI, N.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. E.; ARIGONY-NETO J. Small cirque glaciers retreat on Keller Peninsula, Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 49-56, 2004.
40. SMITH, M. J.; PAIN, C. F. Applications of remote sensing in geomorphology. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 33, n. 4, p. 568-582, 2009. DOI: 10.1177/0309133309346648.
41. TADONO, T.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; IWAMOTO, H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 2, n. 4, p. 71-76, 2014. DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
42. TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K.; ICHIKAWA, M. Validation of “AW3D” global DSM generated from ALOS PRISM. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 3, n. 4, p. 25-31, 2016. Doi: 10.5194/isprsannals-III-4-25-2016.
43. VARGA, M.; BAŠIĆ, T. Accuracy validation and comparison of global digital elevation models over Croatia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 1, p. 170-189, 2015. DOI: 10.1080/01431161.2014.994720.
44. ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**, v. 30, p. 1019-1028, 1994. DOI: 10.1029/93WR03553.
45. WESSEL, B.; HUBER, M.; WOHLFART, C.; MARSCHALK, U.; KOSMANN, D.; ROTH, A. Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 139, p. 171-182, 2018. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.