

# MODELAGEM RESIDUAL DO TERRENO A PARTIR DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO – ESTUDO DE CASO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Rodrigo da Silva Ferraz<sup>1</sup>  
Sérgio Florêncio de Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento  
Remoto – PPG UFRGS

[rferraz1980@gmail.com](mailto:rferraz1980@gmail.com)  
[sergioflorenciodesouza@gmail.com](mailto:sergioflorenciodesouza@gmail.com)

## RESUMO

Nos últimos anos foram disponibilizados para a comunidade acadêmica diversos modelos digitais de elevação (MDE), como os provenientes das missões SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e recentemente do Copernicus, todos com resolução espacial de 30 metros. Na Geodésia, os MDE de alta resolução são usados para fornecer o conteúdo de alta frequência do espectro do campo gravitacional por meio de métodos de redução de massa como, por exemplo, o efeito de Bouguer simples e refinado, a modelagem de topografia residual e reduções isostáticas. Nesse contexto se insere a técnica de redução de modelagem residual do terreno (RTM, em inglês *Residual Terrain Modelling*), cujo objetivo consiste na modelagem do campo de gravidade em função da distribuição de massas associadas à topografia. Essa técnica aborda a diferença entre a Redução de Bouguer e a Correção do Terreno utilizando-se de uma superfície de referência. Nesse contexto se insere o objetivo principal desse estudo que é verificar a influência da utilização dos modelos SRTM, ASTER e Copernicus, no cálculo da anomalia de gravidade residual usando a redução RTM. No presente trabalho, os estudos ficaram restritos a área que compreende os limites do estado do Rio Grande do Sul, onde foram avaliados 5880 pontos gravimétricos, obtendo valores médios entre 5.85 mGal e 6.95 mGal.

**Palavras chaves:** Modelagem Residual do Terreno, Redução de Bouguer, SRTM, ASTER, Copernicus.

## 1. INTRODUÇÃO

Na Geodésia os MDE são empregados para cálculos de correções de terreno uma vez esses modelos fornecem o conteúdo de alta frequência do espectro através dos métodos de redução de massa. Nas técnicas modernas de correções de terreno, MDE de alta resolução são empregados com a finalidade de se estimar a anomalia de gravidade relacionada às massas topográficas. Nesse contexto se insere a técnica de redução de modelagem de topografia residual (do inglês *Residual Terrain Modelling* - RTM), descrita por Forsberg (1984), que é empregada com a finalidade de se estimar o campo de gravidade e utiliza como superfície de referência um MDE de alta resolução. A técnica de modelagem RTM utiliza o cálculo da anomalia completa de Bouguer e o cálculo do potencial utilizando a integral de Newton que pode ser discretizada em elementos geométricos que podem ser representados por prismas, tesseroides e poliedros.

Até o ano de 2010 eram poucos os estudos envolvendo a correção de terreno haja vista a dificuldade de obtenção de MDE de alta resolução e muitas vezes esse termo era negligenciado no cálculo da anomalia de gravidade haja vista que a modelagem do terreno muitas vezes era feita a partir de cartas topográficas com dados altimétricos com baixa confiabilidade, geralmente

modelos gerados a partir de processos de interpolação de curvas de nível. A partir do ano de 2002 os dados da missão SRTM começaram a ser disponibilizados para a comunidade acadêmica, mas a limitação era que a resolução espacial desse tipo de produto cartográfico era de 90 metros onde os resultados eram semelhantes aos obtidos a partir de cartas topográficas. No ano de 2014 os modelos SRTM e ASTER com resolução espacial de 30 metros começaram a ser amplamente disponibilizados para qualquer usuário e no segundo semestre de 2020 a Agência Espacial Européia começou a disponibilizar os modelos Copernicus para qualquer usuário.

Nesse contexto, a partir da técnica de modelagem RTM, surge um questionamento sobre qual seria um MDE adequado para se utilizar nesse tipo de abordagem haja vista que há diversas formas de se obter MDE de alta resolução como, por exemplo, utilizando Fotogrametria, *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*), radar de abertura sintética (SAR) e Topografia e cada tipo de técnica possui um determinado tipo de aplicação. Onde os MDE que são empregados para o mapeamento de áreas mais extensas, no caso os gerados por Fotogrametria, *LiDAR* e SAR possuem os erros altimétricos com uma ordem de grandeza maior em comparação com modelos utilizados em áreas com menores dimensões, no caso modelos gerados por Topografia.

Em relação aos modelos ASTER e SRTM há uma vasta literatura em diversas áreas de conhecimento como, por exemplo, Geodésia, Sensoriamento Remoto e na área ambiental onde podemos citar os trabalhos desenvolvidos visando à correção do terreno em cálculos geodésicos como, por exemplo, em Hirt et al (2019), Varga et al (2019) e Yahaya e El Azzab (2018). Porém, existe pouca literatura em relação aos MDE Copernicus, desenvolvidos pela Agência Espacial Européia, haja vista que esse modelo foi disponibilizado para a comunidade acadêmica apenas no ano de 2020.

Nesse contexto, o objetivo principal desse estudo consiste em avaliar a influência da utilização de diferentes MDE no cálculo da gravidade usando a técnica de redução RTM. No presente estudo utilizaram-se os MDE oriundos das missões SRTM, ASTER e o modelo Copernicus. Os experimentos foram desenvolvidos em uma área de aproximadamente 282 mil quilômetros quadrados que consiste nos limites do estado do Rio Grande do Sul. Uma das principais contribuições desse estudo refere-se à avaliação da utilização do MDE Copernicus que foi recentemente disponibilizado para a comunidade acadêmica a partir do ano de 2020 e, até o presente momento, há poucos estudos envolvendo o mesmo.

## 2. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Os estudos foram desenvolvidos em uma área de teste que consiste nos limites do estado do Rio Grande do Sul que possui aproximadamente 282 mil quilômetros quadrados conforme a Fig. 1. Nesse experimento foram utilizados 5880 pontos com dados gravimétricos medidos em campo.

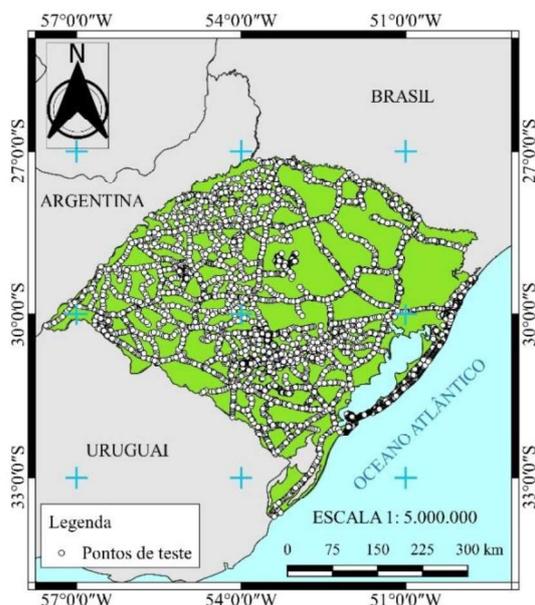


Fig. 1 – Área de estudo.  
Fonte: Os autores.

Os cálculos da gravidade usando a redução RTM ( $\Delta g_{RTM}$ ) compreendem a Redução de Bouguer subtraída do valor da Correção do Terreno representadas pela Eq. (1) (FORSBERG, 1984):

$$\Delta g_{RTM} = 2\pi G\rho(H - H_{ref}) - t \quad (1)$$

onde  $G$  representa a constante de gravitação universal de Newton,  $\rho$  representa o valor da densidade adotada (geralmente  $2670 \text{ kg/m}^3$ ),  $H$  a origem do ponto de cálculo,  $H_{ref}$  a altura da feição que será calculado o efeito gravitacional e  $\rho$  o valor da densidade. O segundo termo da Eq. (1), refere-se à correção do terreno ( $t$ ), conforme a Eq. (2), e ele pode ser derivado a partir da integral de Newton descrita onde o termo  $l$  refere-se a distância euclidiana do ponto de cálculo até a superfície de referência, no caso, a superfície topográfica (FORSBERG, 1984; TZIAVOS; SIDERIS, 2013).

$$t = G \iint_E \int_{H_{ref}}^H \rho \frac{H_p - z}{l^3} dx dy dz \quad (2)$$

A discretização da integral de Newton a partir da Eq. (2) pode ser verificada em detalhes em Heck e Seiz (2007). No presente estudo a discretização da Eq. (2) foi realizado utilizando o elemento de massa tesseróide tendo em vista as dimensões da área de estudo.

## 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 1 consta um resumo estatístico, em mGal, dos resultados obtidos em cada experimento.

Estatística	SRTM	ALOS	COPERNICUS
Média	5,85	6,15	6,95
Desv-Pad	2,35	1,85	0,95
Máximo	32,66	35,45	34,75
Mínimo	-3,45	-3,20	-2,95

Tabela 1–Valores de erros obtidos em cada experimento.

Na Tabela 1 consta os resultados obtidos em cada experimento onde se encontra uma análise utilizando boxplot em cada experimento visando estimar a quantidade de pontos discrepantes (*outliers*), no caso, pontos com valores da gravidade RTM acima dos máximos obtidos em cada experimento. Verificou-se que nesse estudo dos 5880 pontos houve 350 *outliers*, fato esse que pode indicar que existem falhas nos modelos ou nos dados medidos em campo.

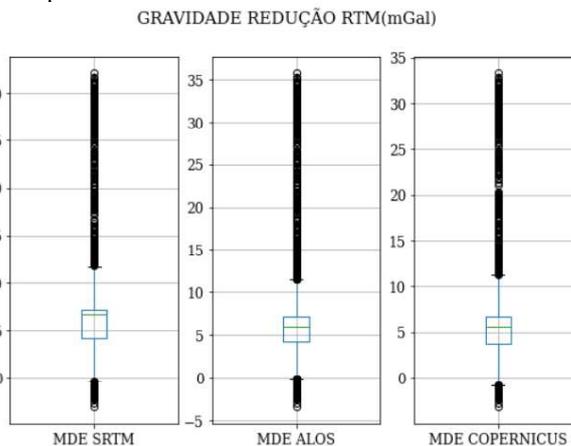


Fig. 2 – Resultados obtidos de cada experimento avaliado.

Na Fig. 3 consta um resumo com os valores de média e desvio-padrão de cada experimento. O valor do

desvio-padrão foi menor no modelo mais atual, no caso o modelo Copernicus, e o desvio-padrão foi maior no modelo cuja literatura apresenta os valores de erros verticais com magnitude maior, no caso o modelo SRTM.

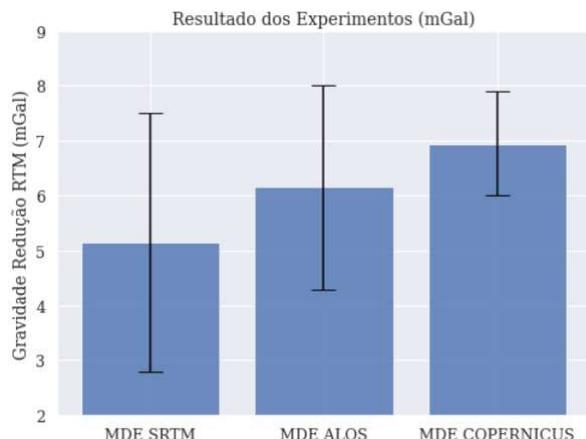


Fig. 3 - Média e desvio-padrão de cada experimento.

Fazendo uma análise de variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95% os resultados apontam diferenças significativas entre os valores da gravidade usando a técnica de redução RTM oriundas do modelo Copernicus em relação aos modelos SRTM e ASTER. Tal fato pode ter relação em função dos erros verticais associados a cada modelo e também em função da época de aquisição dos dados sendo o modelo com os dados mais atuais; neste caso o Copernicus apresentou os menores e o SRTM, os maiores valores de desvio-padrão.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do presente estudo foi verificar a influência da utilização de diferentes modelos digitais de elevação (MDE) no cálculo da gravidade usando a técnica de redução de modelagem residual do terreno. Os MDE SRTM, ALOS e Copernicus possuem uma resolução espacial de 30 metros, sendo o modelo Copernicus, o mais recente a ser disponibilizado para a comunidade acadêmica. A área utilizada para a realização dessa pesquisa, tem cerca de 282 mil quilômetros quadrados, compreendendo os limites do estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados 5880 pontos de teste com dados gravimétricos medidos em campo. Os resultados mostraram que houve diferença significativa entre o modelo Copernicus e os modelos ASTER e SRTM. O desvio-padrão do valor da gravidade usando a técnica de redução RTM do modelo Copernicus foi o menor dos três experimentos. A principal contribuição desse estudo foi à avaliação do MDE Copernicus no cálculo da gravidade usando a técnica de redução RTM e o mesmo apresentou um valor de desvio-padrão menor em relação aos modelos SRTM e ASTER indicando que esse dado pode ser empregado em cálculos geodésicos que envolvem correções de terreno.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Copernicus DEM. 2021. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/documents/20126/0/GEO>

Anais X SAPGU (2021) – I SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL-PORTUGAL (ISBN 978-65-5973-059-9)

[1988-CopernicusDEM-SPE-002\\_ProductHandbook\\_11.00.pdf](#). Acessado em 03Set 2021.

ELKHRACHY, Ismail. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 9, n. 4, p. 1807-1817, 2018.

FORSBERG, R. Study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity-field modeling. Technical report. Ohio State Univ. Research Foundation, Columbus (USA), 1984.

HECK, B.; SEITZ, K. A comparison of the tesseroid, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *Journal of Geodesy*, v. 81, n. 2, p. 121-136, 2007.

HIRT, C.; BUCHA, B.; YANG, M.; KUHN, M. A numerical study of residual terrain modelling (RTM) techniques and the harmonic correction using ultra-high-degree spectral gravity modelling. *Journal of Geodesy*, v. 93, n. 9, p. 1469-1486, 2019.

ORLANDI, Alex Gois et al. Vertical accuracy assessment of the processed SRTM data for the Brazilian territory. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 25, 2019.

YAHAYA, S. I.; EL AZZAB, D. High-resolution residual terrain model and terrain corrections for gravity field modelling and geoid computation in Niger Republic. *Geodesy and Cartography*, v. 44, n. 3, p. 89-99, 2018.

TZIAVOS, I. N.; SIDERIS, M. G. Topographic Reductions in Gravity and Geoid Modeling. In: Sansò, F.; Sideris, M. G. (Ed.). *Geoid Determination: Theory and Methods*. Lecture Notes in Earth System Sciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. p. 337-400.

VARGA, M.; GRGIĆ, M.; BJELOTOMIĆ ORŠULIĆ, O.; BAŠIĆ, T. Influence of digital elevation model resolution on gravimetric terrain correction over a study-area of Croatia. *Geofizika*, v. 36, n. 1, p. 17-32, 2019.