



Avaliação do modelo geoidal MAPGEO2015 no estado do Rio Grande do Sul

Evaluation of MAPGEO2015 geoid model in the state of Rio Grande do Sul

*Gabriela Pasetto Falavigna*¹

*Gustavo Diego Bledow*¹

*Sérgio Florêncio de Souza*¹

*Andrea Lopes Iescheck*²

Recebido em janeiro de 2018.

Aprovado em agosto de 2018.

RESUMO

Com o advento dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) houve a superação das dificuldades de posicionamento, tornando possível alcançar altas precisões e suprir as mais diversas necessidades de posicionamento planimétrico. A determinação da altitude normal-ortométrica, de forma rápida e precisa, por outro lado, mostra-se como o grande desafio da Geodésia. Atualmente, o emprego de dados de receptores GNSS associados a modelos geoidais aumentou significativamente nas práticas de levantamentos, principalmente em locais onde a rede altimétrica é pouco densificada. Isso se dá em virtude da praticidade e rapidez na obtenção de tal altitude, quando comparado às técnicas clássicas de transporte de altitudes, apesar da precisão dessa técnica ser incompatível com a precisão do nivelamento geométrico. Diante disso, o objetivo desse estudo consiste em verificar a viabilidade da utilização do modelo geoidal MAPGEO2015 na determinação de altitudes normais-ortométricas no estado do Rio Grande do Sul (RS), bem como analisar espacialmente e quantitativamente o MAPGEO2015 considerando a geomorfologia do estado. As diferenças entre a altitude geoidal obtida a partir das altitudes geométrica e normal-ortométrica dos memoriais descritivos das estações e a altitude geoidal calculada pelo MAPGEO2015 foram comparadas direta, estatística e espacialmente, e também analisadas em conjunto com as unidades geomorfológicas presentes no estado. Os resultados obtidos mostram que o MAPGEO2015 apresenta variação de -50 cm até 40 cm, aproximadamente, em relação às altitudes geoidais utilizadas como referência, com um valor médio de 13 cm e desvio padrão de 19 cm, ficando evidente um vetor de crescimento das diferenças encontradas no sentido norte-sul do RS. Por fim, evidenciou-se que o modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015 converge com as altitudes geoidais de referência em algumas regiões do estado (extremo oeste, centro e nordeste) e apresenta

¹Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS, Brasil. E-mail: gabriela.falavigna@ufrgs.br; gdbledow@gmail.com; sergio.florencio@ufrgs.br

²Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, UFRGS, Brasil. E-mail: andrea.iescheck@ufrgs.br

algumas diferenças para outras regiões (sul, sudeste, norte e noroeste). Assim, nota-se que o modelo de ondulação geoidal do Brasil necessita melhorar no estado do RS e sua utilização deve estar condicionada à precisão final que o usuário deseja obter.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos geoidais. MAPGEO2015. GNSS. Altitudes. Geomorfologia.

ABSTRACT

With the advent of Global Navigation Satellite System (GNSS) the difficulties of positioning were overcome, become possible to get high precisions and supply the most diverse needs of planimetric positioning. On the other hand, the determination of normal-orthometric height, in a fast and precise way, shows itself as the great challenge of Geodesy. Nowadays, the use of GNSS receivers' data associated to geoid models has increased significantly in the survey practices, mainly in areas where the altimetric network is low densified. This occurs due to the practicality and speed of obtaining such height, when compared to the classic techniques of height transportation, although the precision of this technique is inconsistent with the precision of geometric leveling. Therefore, the goal of this paper is to verify the viability of the use of MAPGEO2015 geoid model in the determination of normal-orthometric height to the state of Rio Grande do Sul (RS), as well as to analyze spatially and quantitatively MAPGEO2015 considering the geomorphology of the state. The differences between geoid height obtained from the geometric and normal-orthometric heights of the descriptive memorials of stations and geoid height calculated by MAPGEO2015 software, were compared directly, statistically and spatially, and also analyzed together with the geomorphological units presents in the state. The results show that MAPGEO2015 has variation of -50 cm up to 40 cm, approximated, for the geoid heights used as reference, with average value of 13 cm and standard deviation of 19 cm, being evident a growth vector of the differences found in the north-south direction of the RS. Finally, it was evidenced that the MAPGEO2015 geoid undulation model shows convergence with the geoid heights reference values for some regions of the state (extreme west, center and northeast) and it shows some differences in other regions (south, southeast, north and northwest). So, it is noted that the Brazilian geoid undulation model should be improved to in the state of RS and its use must be conditioned to final precision that users want.

KEYWORDS: Geoid models. MAPGEO2015. GNSS. Heights. Geomorphology.

* * *

Introdução

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) revolucionaram as atividades que precisam de posicionamento, devido a sua rapidez, praticidade e precisão na obtenção de

coordenadas (IBGE, 2017a). As dificuldades de posicionamento planimétrico foram superadas com o avanço das técnicas de posicionamento com receptores geodésicos, sendo possível alcançar precisões milimétricas e suprir as mais diversas necessidades no campo da engenharia e nos mapeamentos em geral. No entanto, a altitude determinada utilizando receptores GNSS consiste na altitude geométrica (elipsoidal), a qual não pode ser utilizada diretamente para mapeamento e nem nas atividades de engenharia, pois, no Brasil, conforme caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), dada pela Resolução do Presidente do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) N° 1/2005, deve-se utilizar altitudes normais-ortométricas referenciadas aos Data Verticais Brasileiros (DVB). A determinação da altitude normal-ortométrica pode ser feita, basicamente, através de dois métodos: o primeiro consiste no emprego das técnicas clássicas de nivelamento (geométrico, trigonométrico e taqueométrico); e o segundo, na associação entre dados de receptores GNSS e modelos geoidais. Vale destacar que as altitudes normais-ortométricas que caracterizam o SGB são determinadas por nivelamento geométrico. Atualmente, houve um crescimento no emprego do segundo método nas práticas de levantamentos, principalmente em locais onde a rede altimétrica é pouco densificada; isso se dá em virtude da praticidade e rapidez na obtenção da altitude normal-ortométrica, comparado às técnicas clássicas de nivelamento. A escolha de um método ao invés do outro se baseia na precisão da informação altimétrica desejada pelo usuário. O primeiro método de determinação de altitudes normais-ortométricas (técnicas clássicas de nivelamento) é um método tradicional e bem consolidado, que proporciona precisões na ordem de milímetros ou centímetros; o segundo método (associação entre dados de receptores GNSS a modelos geoidais), porém, pode oferecer diferentes precisões para as informações altimétricas, dependendo da região, do modelo geoidal e do tipo de posicionamento GNSS adotado.

Conforme citado, a determinação de altitudes normais-ortométricas de forma prática, rápida e precisa é um dos principais desafios das ciências

geodésicas na atualidade. Os métodos usualmente adotados aplicam técnicas clássicas de nivelamento ou utilizam modelos geoidais associados às observações de satélites artificiais obtidas por receptores GNSS.

Os modelos geoidais são modelos do campo de gravidade da Terra determinados pela integração de dados obtidos por uma grande variedade de instrumentos e técnicas observacionais, como, por exemplo, dados oriundos de veículos espaciais e de missões gravimétricas espaciais, terrestres, aéreas e marinhas, entre outras fontes de dados. Existem modelos geoidais globais, como o *Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008) e o EIGEN-6C4; regionais, como o modelo brasileiro MAPGEO2015; e modelos locais, determinados para estados e municípios. O MAPGEO2015 é um modelo de ondulação geoidal para o Brasil, concebido e produzido conjuntamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através da Coordenação de Geodésia (CGED), e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Este modelo possui uma resolução de 5' de arco (IBGE, 2017a) e permite calcular a altitude geoidal para pontos sobre a superfície terrestre, que estejam dentro do território brasileiro. Os modelos geoidais globais, regionais e locais são usualmente empregados nas práticas de levantamentos em conjunto com dados de receptores GNSS para converter altitudes geométricas (elipsoidais) em altitudes normais-ortométricas.

Pavlis et al. (2012) avaliaram o desenvolvimento e a evolução do modelo global do geopotencial EGM2008. Uma das avaliações realizadas foi comparar esse modelo a uma base de dados de 12.387 pontos independentes, distribuídos sobre 52 países ou territórios. As discrepâncias obtidas entre as altitudes geoidais do EGM2008 e os valores independentes oriundos de GPS/Nivelamentos foram da ordem de ± 5 a ± 10 cm. Em seu trabalho, realizaram também comparações entre as deflexões da vertical do EGM2008 e as deflexões astrogeodésicas da vertical de dois conjuntos de dados; um desses conjuntos consistia de 3.561 pares de deflexões meridionais e verticais (ξ , η) distribuídos sobre o CONUS (*The Conterminous US*) e o outro conjunto consistia de 1.080 pares (ξ , η) espalhados sobre a Austrália. As deflexões da

vertical do EGM2008 sobre ambos os países (EUA e Austrália) comparadas aos valores astrogeodésicos independentes variaram entre $\pm 1,1$ a $\pm 1,3$ segundos de arcos.

Wang et al. (2011) analisaram o modelo geoidal gravimétrico USGG2009 (*The US Gravimetric Geoid of 2009*). Em seu trabalho, as altitudes geoidais do USGG2009 foram comparadas a valores de controle determinados por 18.398 pontos de referência sobre o CONUS, onde ambas as altitudes elipsoidais acima do NAD83 (*North American Datum 1983*) e as altitudes ortométricas de Helmert acima do NAVD88 (*North American Vertical Datum of 1988*) eram conhecidas. O desvio-padrão das diferenças obtido foi igual a 6,3 cm. Wang et al. (2011) também compararam o modelo USGG2009 às altitudes geoidais derivadas de 40 marégrafos e de um modelo físico dinâmico da topografia do oceano no Golfo do México; a média das diferenças obtida foi de 3,3 cm e seu desvio-padrão foi de 5,0 cm. E ainda, quando as deflexões da vertical derivadas do USGG2009 foram comparadas às 3.415 observações de deflexões astrogeodésicas da superfície, os desvios-padrão encontrados das diferenças nas componentes N-S e L-O foram de 0,87" e 0,94", respectivamente.

Blitzkow et al. (2016) apresentaram o modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015 como alternativa para transformação de altitudes geométricas em altitudes com sentido físico. Para avaliar a consistência desse modelo utilizaram 592 pontos de nivelamento geométrico da Rede Altimétrica de Alta Precisão do SGB e, com isso, observaram uma melhoria de aproximadamente 20% em relação ao modelo de ondulação geoidal MAPGEO2010. Outra questão pertinente a respeito do modelo MAPGEO2015 é abordada por Arana et al. (2018). Em seu estudo realizaram uma avaliação do método de interpolação do MAPGEO2015, buscando quantificar a magnitude do erro proveniente da interpolação de malhas regulares de modelos geoidais. Arana et al. (2018) compararam os resultados obtidos a partir da interpolação do programa MAPGEO2015 com interpoladores diversos, tendo como referencial analítico o erro obtido na validação do modelo brasileiro.

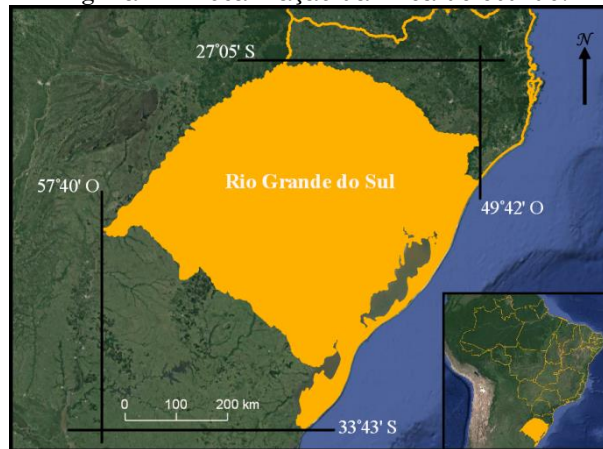
Em 2015, o IBGE fez uma avaliação do MAPGEO2015 para o Brasil. Nessa avaliação, realizou criteriosa seleção de estações da Rede Altimétrica Brasileira, identificando as conexões que faziam parte de linhas de nivelamento fechadas (com valores de altitude ajustados) e suprimindo as estações que não participaram do último ajustamento da Rede Altimétrica de Alta Precisão (IBGE, 2015b). Para a avaliação do modelo no RS, o IBGE utilizou 22 estações SAT que também são RRNN (Referências de Nível); ficando de fora 4 estações pertencentes a ramais, 2 estações destruídas e outras 5 estações SAT que também são RRNN.

Ao considerar a praticidade dos modelos geoidais para determinação de altitudes normais-ortométricas, o baixo adensamento da rede altimétrica nacional e a dificuldade de localização e de manutenção das RRNN, o uso destes modelos deve ser objeto de investigação científica. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho consiste em verificar a viabilidade da utilização do modelo geoidal MAPGEO2015 na determinação de altitudes normais-ortométricas no estado do Rio Grande do Sul (RS). Para tanto, o modelo geoidal MAPGEO2015 será analisado, espacial e quantitativamente, considerando as unidades geomorfológicas presentes no estado.

2 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo desse trabalho localiza-se na região sul do Brasil e compreende o estado do Rio Grande do Sul (RS). O RS é delimitado pelas latitudes 33°43'S e 27°05'S e pelas longitudes 49°42'O e 57°40'O, fazendo fronteira ao norte com o estado de Santa Catarina, a oeste com a Argentina, ao leste com o oceano Atlântico e ao sul com o Uruguai (Figura 1).

Figura 1 – Localização da Área de estudo.

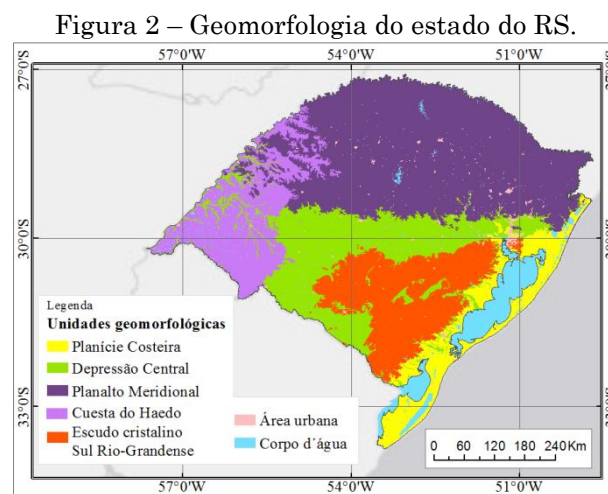


Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2017), o estado apresenta cinco unidades geomorfológicas bem definidas, a saber: Planalto Meridional, *Cuesta do Haedo*, Depressão Central, Escudo cristalino Sul-Riograndense e Planície Costeira. Gonçalves e Santos (1985) definem estas unidades da seguinte maneira: o Planalto Meridional é a porção norte do estado, pertencente ao domínio morfoestrutural das bacias e coberturas sedimentares, o qual corresponde à maior extensão espacial do RS; sua formação tem origem do empilhamento de sucessivos derrames basálticos intercalados por camadas de arenito, ocorridos na era Mesozóica. No extremo oeste do estado está localizada a *Cuesta do Haedo*, uma área resultante de erosão diferencial, com resquícios do Planalto Meridional, tratando-se de uma região de campos que apresenta altitude média de 100 m alcançando a faixa de 300 m em pontos remotos. No corredor central do estado está localizada a Depressão Central, área formada por rochas sedimentares, constituída da era Paleozóica, com topografia suave, sem grandes variações altimétricas e altitudes que não ultrapassam 200 m. Na região sul, apresenta-se o Escudo cristalino, uma região formada por rochas ígneas do período Pré-Cambriano, compreendendo a porção sudeste riograndense, possuindo relevo ondulado com grande variação altimétrica (de 40 m até mais de 400 m) e alta complexidade geológica. Por fim, no leste do estado está localizada a Planície Costeira, com origem no período Quaternário da era Cenozóica, tratando-se

de uma porção do estado com formação dinâmica, decorrente dos processos sedimentares marinhos.

Em contrapartida, o IBGE classifica a geomorfologia do estado do RS em 14 unidades geomorfológicas. Nesse estudo, a distribuição espacial da geomorfologia do estado provém do IBGE (IBGE, 2017b), porém, as classes das unidades geomorfológicas foram sintetizadas seguindo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2017) e as definições dadas por Gonçalves e Santos (1985), conforme pode ser visualizado na Figura 2. Entretanto, devido às áreas urbanas e aos corpos d'água do estado estarem representados em classes separadas pelo IBGE, além das cinco classes geomorfológicas citadas constam, na Figura 2, as classes referentes a áreas urbanas e corpos d'água.



Fonte: Adaptado de IBGE (2017b) e Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2017).

3 Metodologia

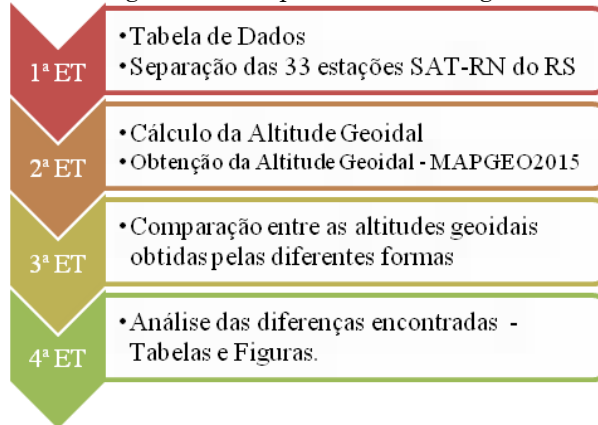
No desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se o modelo geoidal MAPGEO2015, os memoriais descritivos de 33 estações SAT do RS com vínculo à rede altimétrica e o *software* Surfer 8. Os memoriais descritivos das estações, disponibilizados pelo IBGE, trazem informações como: nome, localização, descrição e tipo da estação; situação do marco (bom ou destruído);

dados planialtimétricos da estação (latitude, longitude, altitude geométrica, coordenadas UTM, datum horizontal, método utilizado na determinação e as precisões envolvidas); dados altimétricos da estação (altitude normal-ortométrica, datum vertical, método utilizado na determinação e as precisões envolvidas); e dados gravimétricos (valor da gravidade e datum). Segundo estes memoriais, todas as altitudes geométricas foram determinadas a partir do rastreamento de satélites com receptores GPS Geodésicos e as altitudes normais-ortométricas foram obtidas por nivelamento geométrico. Neste trabalho, essas estações são denominadas “estações SAT-RN”.

Para a interpolação das diferenças entre as altitudes geoidais para o estado do RS, foi utilizado o *software* Surfer 8. Este programa, desenvolvido pela empresa norte-americana *Golden Software*, consiste em um pacote de ferramentas para manipulação e visualização de dados espaciais (GOLDEN SOFTWARE, 2017), e foi escolhido por ser um *software* de fácil compreensão e manuseio e, principalmente, por atender às necessidades de manipulação e visualização dos dados deste trabalho.

A metodologia adotada nesse estudo, do ponto de vista de sua natureza, é definida como uma pesquisa aplicada, cujo objetivo é a discussão da utilização prática do modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015. Aborda-se a problemática da obtenção da altitude geoidal de forma quantitativa e qualitativa, uma vez que trata a representação numérica e espacial das diferenças entre as altitudes geoidais, tendendo à análise e mensuração comparativa numérica e se valendo de conceitos estatísticos. Do ponto de vista da objetividade, classifica-se como um estudo de objetivo descritivo, baseado nas técnicas de levantamento documental analítico, bem como estudo de caso aplicado ao estado do Rio Grande do Sul. Para alcançar os objetivos propostos, foram consideradas quatro etapas metodológicas (Figura 3), as quais englobam a aquisição e organização dos dados; o cálculo das altitudes geoidais; a comparação entre as altitudes geoidais obtidas; e a análise dos resultados.

Figura 3 – Etapas da Metodologia.

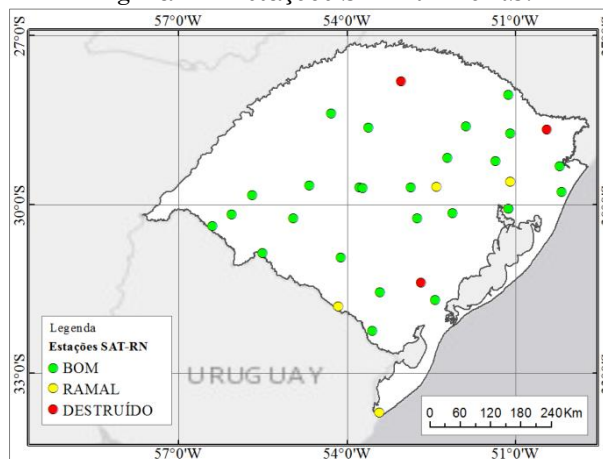


Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Aquisição e organização dos dados

A primeira etapa da metodologia compreende a seleção das estações SAT que também são RRNN, isto é, foram separadas e selecionadas as estações presentes no estado que pertencem, concomitantemente, à rede planimétrica e à rede altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro. Deste procedimento, obteve-se uma planilha com 33 estações SAT-RN, cuja distribuição espacial pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 – Estações SAT-RN no RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Destas 33 estações selecionadas, 4 pertencem a ramais, ou seja, as RRNN pertencem a uma linha de nivelamento geométrico que não forma circuito, cujos desníveis, portanto, não podem ser ajustados e, como consequência, as respectivas altitudes são calculadas mediante simples transporte, sem as estimativas de desvio-padrão; 3 estão destruídas e as demais (26 estações) estão em bom estado de conservação. As informações constantes na planilha compreendem a nomenclatura de cada estação (tanto para rede altimétrica – RN – quanto para a planimétrica – SAT), suas altitudes (normal-ortométrica e geométrica), bem como as respectivas precisões. Para as estações pertencentes a ramais, por não apresentarem precisões associadas uma vez que não apresentam possibilidade de ajustamento, foram atribuídas precisões iguais a pior precisão encontrada para as estações componentes da amostra (8 cm). As informações altimétricas são referenciadas ao Datum Vertical Brasileiro de Imbituba/SC e estabelecidas a partir da técnica clássica do nivelamento geométrico. Além destas, também compreende informações planimétricas (obtidas através de posicionamentos com receptores GPS Geodésicos e utilizadas nas análises espaciais) e observações gravimétricas das estações SAT-RN que as possuem (4 estações).

3.2 Cálculo da Altitude Geoidal

A segunda etapa trata do cálculo das altitudes geoidais para as 33 estações SAT-RN por dois métodos distintos. Destaca-se que as altitudes estão vinculadas ao sistema de maré média (“*mean tide*”). Os valores resultantes foram organizados em tabelas.

No primeiro método, a altitude geoidal (N) foi obtida diretamente pelo cálculo da diferença entre as altitudes geométrica (h) e normal-ortométrica (H) ($N \approx h - H$). Os valores destas altitudes proveem dos memoriais descritivos das estações SAT-RN. E, no segundo método, a altitude geoidal (N_MG2015)

foi interpolada a partir do modelo geoidal MAPGEO2015; destaca-se que o modelo foi utilizado de forma absoluta.

3.3 Comparação entre as Altitudes Geoidais

Nesta etapa, fez-se a comparação das altitudes geoidais N e N_{MG2015} . A partir dos valores obtidos para estas altitudes geoidais, calculou-se a diferença entre elas ($DIF = N - N_{MG2015}$).

Complementarmente foram calculados: o erro médio quadrático (EMQ) da altitude geoidal (N), obtido a partir das precisões das altitudes geométricas e normais-ortométricas; o intervalo de confiança de N ($N - EMQ$ a $N + EMQ$); e a distância da altitude geoidal obtida pelo MAPGEO2015 (N_{MG2015}) até o intervalo de confiança calculado. Segundo Gemael (1994), o erro médio quadrático (EMQ) é um índice de precisão usado na terminologia do geodesta, que consiste na raiz quadrada da média dos quadrados dos erros verdadeiros de uma observação isolada. Em síntese, o EMQ é uma medida que busca avaliar a diferença entre um estimador e o valor verdadeiro. Neste trabalho, o **EMQ** foi calculado através da Equação 1:

$$EMQ = \pm\sqrt{(\sigma h)^2 + (\sigma H)^2} \quad (1)$$

Onde, σh corresponde à precisão da altitude geométrica e o σH à precisão da altitude normal-ortométrica das estações SAT-RN, obtidas em seus respectivos memoriais descritivos.

Analiticamente, quanto menor a diferença entre a altitude geoidal N_{MG2015} e a altitude geoidal N , mais próximo de representar a realidade está o modelo e mais confiável é o seu uso. No entanto, é possível estabelecer um intervalo de confiança para N em que o valor da altitude geoidal calculada pelo MAPGEO2015 possa estar contido, moldando a simples diferença entre as altitudes geoidais em uma análise estatística dos resultados.

3.4 Análise dos Resultados

A quarta etapa envolve as análises qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos, a partir da análise visual dos modelos e mapas gerados das diferenças numéricas diretas obtidas e das estatísticas apresentadas. Para as discussões, partiu-se do pressuposto que a referência para a altitude geoidal (N) resulta da diferença entre as altitudes geométrica e normal-ortométrica, usando tal informação como base crítica analítica para o comportamento do modelo geoidal MAPGEO2015. Enfatiza-se que possíveis problemas inerentes às práticas de levantamento planialtimétrico para materialização de redes não foram considerados, uma vez que não há possibilidade de detecção de erros grosseiros nos dados amostrais.

Neste estudo, para análise do modelo geoidal MAPGEO2015 no estado do RS, utilizaram-se as diferenças entre as altitudes geoidais N e N_MG2015 para todas as 33 estações SAT-RN. A análise visual destas diferenças visa à apreciação do comportamento do MAPGEO2015 nas diferentes regiões (unidades geomorfológicas) do estado. Para possibilitar o reconhecimento de padrões espaciais de distribuição e sua possível correlação com as unidades geomorfológicas e com as densidades dos materiais que compõem o solo, gerou-se uma superfície representativa das diferenças de ondulações. Esta superfície foi gerada no *software* Surfer 8, por meio de interpolação pelo método da krigagem (“*kriging*”), pois este método, comparado aos demais testados (*natural neighbor*, *nearest neighbor* e *local polynomial*), demonstrou-se mais adequado à representação das diferenças entre as altitudes geoidais.

4 Resultados e Discussão

Na Tabela 1 podem-se visualizar as 33 estações SAT-RN da amostra com suas respectivas altitudes geoidais e a diferença entre essas altitudes; o campo SAT corresponde à nomenclatura da estação GPS, a coluna RN traz a nomenclatura da estação RN, em N apresenta-se a altitude geoidal obtida

pela diferença entre as altitudes geométrica e normal-ortométrica, o campo N_MG2015 corresponde à altitude geoidal calculada pelo modelo geoidal MAPGEO2015 e a coluna DIF mostra a diferença entre os campos N e N_MG2015.

Tabela 1 – Estações SAT-RN e altitudes geoidais.

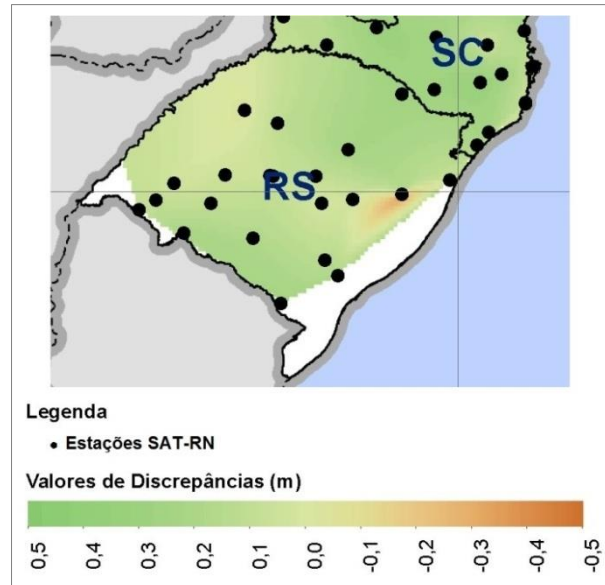
SAT	RN	N (m)	N_MG2015 (m)	DIF (m)
91850	3093H	4,597	5,01	-0,41
91899	3093J	5,180	5,00	0,18
91936	1938J	12,125	12,10	0,02
91938	1941N	13,895	13,68	0,22
91939	1946V	13,663	13,58	0,08
91940	1943J	13,184	13,10	0,08
91943	1937B	12,057	11,96	0,10
91945	1930H	10,351	10,31	0,04
91946	1792L	9,604	9,56	0,04
91947	1792H	9,545	9,46	0,08
91950	1977L	11,966	11,73	0,24
93772	1969N	11,878	11,58	0,30
93774	1953B	13,236	12,86	0,38
93816	1916J	8,617	8,65	-0,03
93972	1413L	7,022	6,76	0,26
93973	1767M	6,899	6,58	0,32
93974	1901U	7,061	7,55	-0,49
93975	1919R	9,022	8,91	0,11
93976	1907L	7,669	7,44	0,23
93977	1770E	7,402	7,15	0,25
94037	1766C	6,540	6,22	0,32
94038	1965U	10,515	10,39	0,12
94039	1790D	6,995	6,97	0,02
94040	1795M	8,823	8,82	0,00
94041	1776B	5,146	5,00	0,15
94042	1966Z	9,456	9,27	0,19
94043	1951R	13,048	12,87	0,18
94044	1791C	8,316	8,22	0,10
94045	1950U	12,533	12,17	0,36
94046	2106N	5,216	4,88	0,34
94047	1780U	3,303	3,24	0,06
96118	1773J	6,281	6,06	0,22
96119	1786L	7,217	7,09	0,13

Fonte: Elaborada pelos autores.

O IBGE fez uma avaliação do modelo geoidal MAPGEO2015 para o Brasil em 2015. Nessa avaliação, para o RS, foram utilizadas 22 estações SAT-RN; ficaram de fora 4 estações pertencentes a ramais, 2 estações destruídas e outras 5 estações SAT-RN. A distribuição espacial das estações

utilizadas pelo IBGE, bem como a sua avaliação para o RS, pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 – Avaliação do MAPGEO2015 pelo IBGE.



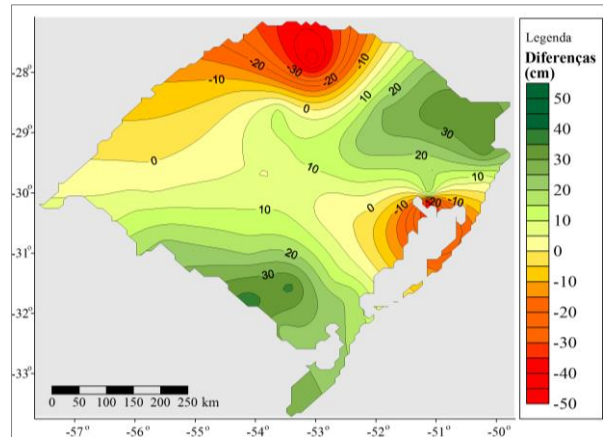
Fonte: Adaptado de IBGE (2015a).

Conforme relatório de apresentação do MAPGEO2015, realizado pelo IBGE, na avaliação do mesmo para a região Sul do país foram utilizadas 60 estações, cujo máximo e mínimo na comparação variou de -0,41 m a 0,33 m (IBGE, 2015b). Analisando a Figura 5, nota-se que o noroeste do RS apresenta as menores discrepâncias comparadas às demais regiões do estado; verifica-se também a existência de discrepâncias negativas no leste do RS, evidenciando um “pico” na região metropolitana (grande variação nos valores de discrepâncias em uma pequena área do estado). Além disso, é perceptível a existência de vazios analíticos na Figura 5, ou seja, áreas em branco onde o modelo MAPGEO2015 não foi avaliado, apesar da existência na região sul de estações SAT-RN pertencentes a ramais e não utilizadas pelo IBGE na avaliação.

Em contrapartida, conforme apontado na metodologia, nesse estudo optou-se por utilizar todas as 33 estações SAT-RN localizadas no RS. Após a interpolação das diferenças entre as altitudes geoidais no *software* Surfer 8,

obteve-se o resultado demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Diferenças entre as altitudes geoidais das estações.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir da interpretação da Figura 6 verifica-se que as maiores diferenças (em módulo) concentram-se nas regiões norte e leste do estado. Percebe-se também que a região central do RS apresenta pequenas diferenças, que variam entre 0 cm e 10 cm, o que indica coerência entre o modelo e os dados adotados como referência nessa região. Em uma macroanálise, pode-se reparar um vetor de aumento das diferenças, partindo de um valor negativo (aproximadamente -50 cm) para um valor positivo (aproximadamente 40 cm), no sentido norte-sul. Uma das causas da existência desse vetor pode estar associada às diferentes unidades geomorfológicas existentes no estado. Para as diferenças de altitudes geoidais da amostra de dados selecionada obteve-se uma média de 13 cm e um desvio-padrão de 19 cm.

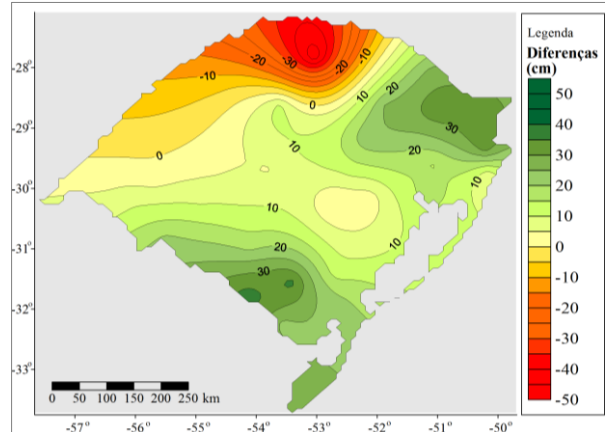
Analisando comparativamente as Figuras 5 e 6, é possível perceber que os resultados obtidos se assemelham nas regiões leste, nordeste e sudeste do estado. Em contrapartida, na faixa litorânea e extremo sul algumas diferenças são notadas, bem como na região norte. Tais diferenças são decorrentes da não utilização pelo IBGE na sua avaliação de informações oriundas das estações SAT-RN presentes nessas regiões, conforme já apontado.

As estações pertencentes a ramais, não utilizadas na avaliação do modelo pelo IBGE, apresentam diferenças entre as altitudes geoidais em conformidade com as discrepâncias das estações nas suas proximidades e presentes no estudo do IBGE; salienta-se que as mesmas não foram utilizadas pelo IBGE devido ao fato de não serem estações ajustadas. A utilização de tais informações poderia auxiliar a avaliação do modelo, além de, no caso da estação pertencente ao ramal SAT93772 – RN1969N, preencher o vazio existente na região sul do estado. Apesar dessa estação pertencer a um ramal, estando a aproximadamente 205 km do ponto de referência ajustado, que deu origem ao seu nivelamento, a mesma apresenta uma precisão aproximada de 10,5 cm. Tal precisão pode ser estimada a partir do valor aproximado do erro esperado por km de cada seção e da geometria da rede de nivelamento descritas no Relatório de Ajustamento da Rede Altimétrica de Alta Precisão do IBGE (IBGE, 2011).

Um ponto a ser considerado refere-se às dificuldades inerentes às atividades de campo, nesse caso, ao nivelamento geométrico. Nessa linha, destaca-se a informação da altitude normal-ortométrica na estação POAL (SAT91850 - RN3093H), que apresenta diferença entre as altitudes geoidais de -41 cm, resultado distinto à outra estação presente no mesmo local (SAT91899 – RN3093J), que apresenta uma diferença de 18 cm entre as altitudes geoidais. No mesmo sentido, outros marcos, componentes da Rede de Referência Cadastral Municipal de Porto Alegre (RRCM-PMPA), cujo nivelamento foi realizado a partir da rede altimétrica materializada pelo IBGE, apresentam diferenças condizentes com esta última estação (SAT91899 – RN3093J), ou seja, discrepâncias na faixa de 18 cm.

A retirada das observações da base POAL modifica a configuração anômala da região metropolitana da capital gaúcha, resultando, conforme exposto na Figura 7, em uma interpolação contínua e homogênea nessa região.

Figura 7 – Diferenças entre as altitudes geoidais sem POAL.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Analisando a Figura 7 e comparando com a Figura 6, percebe-se que, aparentemente, a estação POAL apresenta um possível equívoco na informação da altitude normal-ortométrica. Essa estação está localizada, segundo seu memorial descritivo, na viga de concreto, no alto do prédio do Departamento de Geodésia, no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Tal localização pressupõe dificuldades para o nivelamento, uma vez que se faz necessário subir até o topo da edificação. Ressalva-se que as informações dessa estação foram mantidas nas análises posteriores, uma vez que se optou por utilizar todas as estações SAT-RN do estado, pois não cabe aos autores afirmar que as mesmas contenham erros nas suas informações.

Em uma análise complementar, foram verificados os dados levantados por Souza et al. (2013). Esse levantamento foi realizado em 2005, com receptor GPS Topográfico, onde foram rastreados 43 pontos distribuídos espacialmente sobre todo o RS; cada ponto foi rastreado por 4 horas e o método adotado para o processamento dos dados foi o relativo estático. Desses pontos, 15 são RRNN e 28 são pontos próximos a RRNN, pois a localização física dessas 28 RRNN não possibilitava sua ocupação com o receptor GPS e, por consequência, o rastreamento de satélites sobre essas RRNN. Assim, foram rastreados pontos próximos a essas RRNN, que apresentavam condições para o rastreamento de satélites, e a altitude normal-ortométrica desses pontos foi

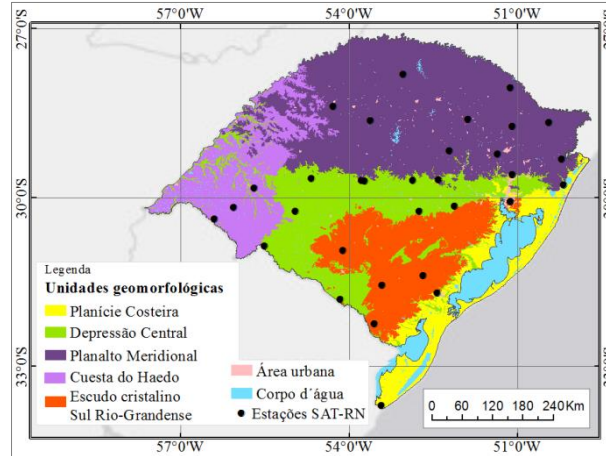
determinada através do transporte de altitudes por nivelamento geométrico. Cada ponto levantado apresenta as seguintes informações associadas: coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica), com suas respectivas precisões; e altitude normal-ortométrica.

Para os 43 pontos, foram atualizadas as informações da altitude normal-ortométrica, devido à realização pelo IBGE de posteriores ajustamentos na rede altimétrica. As altitudes normais-ortométricas determinadas por transporte de altitudes também foram atualizadas, considerando a diferença entre a altitude normal-ortométrica do ponto levantado e a altitude normal-ortométrica da RN próxima, na época do levantamento. Dos 43 pontos levantados por Souza et al. (2013), 3 pontos foram desconsiderados nesse trabalho, pois foram levantados posteriormente pelo IBGE com equipamento de precisão superior (receptor GPS Geodésico).

Assim, para os 40 pontos restantes, foi calculada a altitude geoidal no programa MAPGEO2015, bem como a altitude geoidal dos pontos pela diferença entre a altitude geométrica e a altitude normal-ortométrica atualizada. A diferença obtida entre as altitudes geoidais desses 40 pontos variou aproximadamente de -92 cm a +61 cm, apresentando uma média de 9 cm e um desvio-padrão de 26 cm. Tais resultados demonstram a coerência das estatísticas obtidas na análise anterior, ou seja, mostram a convergência do MAPGEO2015 com as altitudes geoidais das estações SAT-RN (média igual a 13 cm e desvio-padrão igual a 19 cm). Apontam também que as informações altimétricas obtidas por receptores GNSS Topográficos vão ao encontro das informações altimétricas obtidas por receptores GNSS Geodésicos, seguindo as orientações de ocupação e práticas do IBGE, para essa finalidade, conforme observado na comparação dos dados de Souza et al. (2013) com as informações de referência (memoriais descritivos).

A Figura 8 demonstra a distribuição espacial das estações SAT-RN, segundo as unidades geomorfológicas presentes no estado.

Figura 8 – Estações SAT-RN e geomorfologia do RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

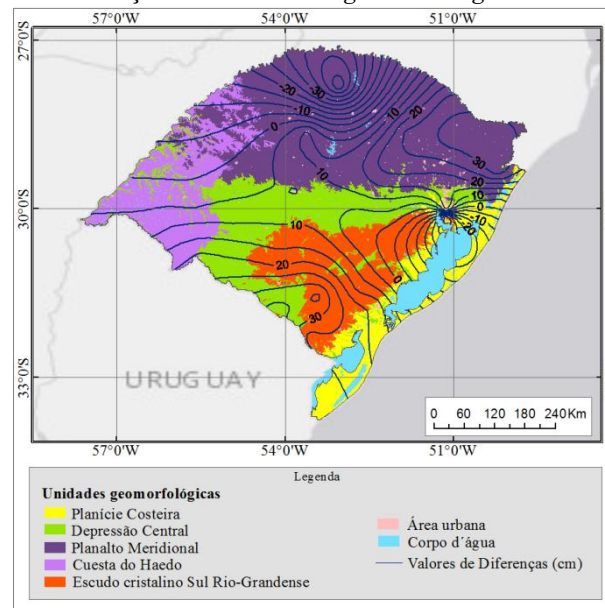
Nota-se, a partir da Figura 8, que três estações SAT-RN localizam-se na unidade geomorfológica Planície Costeira, seis situam-se no Escudo cristalino, dez estações localizam-se na Depressão Central, onze situam-se no Planalto Meridional e três estações na unidade geomorfológica *Cuesta do Haedo*.

A distribuição espacial dos dados gravimétricos utilizados na elaboração do MAPGEO2015 mostra que existem dados pouco densificados no Escudo cristalino e em partes da Depressão Central (sudoeste do estado) e do Planalto Meridional (centro dessa unidade geomorfológica) (IBGE, 2015b). Assim, espera-se que o modelo apresente maior convergência com os dados da rede, utilizados como referência, nas áreas com maior densidade de dados (norte do Planalto Meridional e centro da Depressão Central) e menor convergência nas áreas com menos dados.

As diferenças entre as altitudes geoidais foram também analisadas considerando a geomorfologia do RS. Na Figura 9 podem-se visualizar as diferenças entre as altitudes geoidais das 33 estações SAT-RN, juntamente com a geomorfologia. Verifica-se, a partir da interpretação dessa figura, que existe uma correlação entre a distribuição espacial das diferenças encontradas e as unidades geomorfológicas presentes no estado. Nesse sentido, as maiores diferenças (em módulo) concentram-se nas unidades

geomorfológicas Planalto Meridional e Escudo cristalino e as menores diferenças (em módulo) nas unidades geomorfológicas *Cuesta do Haedo*, Depressão Central e Planície Costeira.

Figura 9 – Diferenças das altitudes geoidais e geomorfologia do RS.



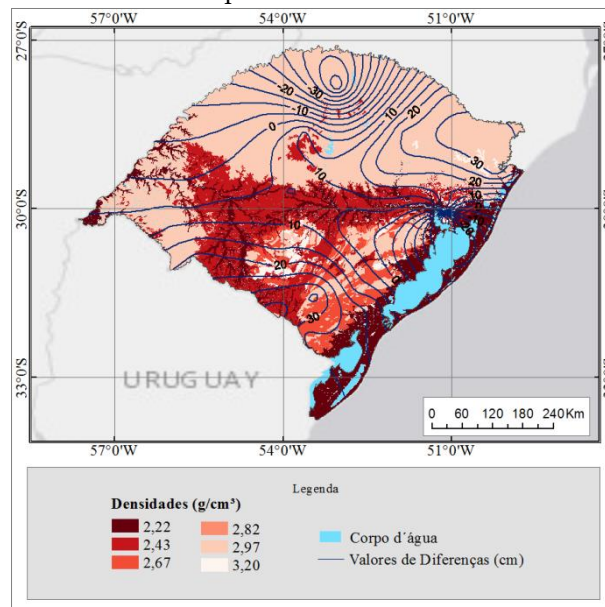
Fonte: Elaborado pelos autores.

Através da interpretação da Figura 9, nota-se que o Planalto Meridional e o Escudo cristalino apresentam diferenças de até, aproximadamente, 50 cm (em módulo). Tais regiões apresentam características físico-topográficas semelhantes, como grande variação altimétrica e alta complexidade geológica. Tais peculiaridades propiciam dificuldades nas atividades de transporte de altitudes pelos métodos clássicos, bem como na obtenção de observações representativas do terreno para concepção de modelos geoidais. Além disso, as complexidades inerentes à formação do solo nessas unidades geomorfológicas implicam a possibilidade de haver diferentes materiais na formação do terreno, o que pode levar a variações no comportamento da gravidade nessas regiões. Em contraponto, as regiões da *Cuesta do Haedo*, Depressão Central e Planície Costeira apresentam pequenas diferenças entre as altitudes geoidais N e N_MG2015 e, conforme pode ser visualizado na Figura 9, baixas variações das mesmas.

Essas oscilações são representadas por curvas suaves, que condizem com as características topográficas dessas unidades geomorfológicas. Ainda, destaca-se que a pouca variação altimétrica facilita tanto as atividades clássicas de transporte de altitudes, quanto a obtenção de dados amostrais para construção de modelos de ondulação geoidal.

A Figura 10 traz as diferenças entre as altitudes geoidais sobrepostas às densidades dos materiais que compõem o solo do RS. A classificação das densidades foi baseada no mapa de variações das densidades laterais topográficas para o estado do Rio Grande do Sul, elaborado por Fortes e Consentino (2017).

Figura 10 – Diferenças das altitudes geoidais sobrepostas às densidades dos materiais que compõem o solo do RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme esperado e confirmado pelas Figuras 9 e 10, percebe-se que a variação da densidade dos materiais que compõem o solo do RS apresenta alta correlação espacial com as unidades geomorfológicas presentes no estado. Nota-se que o Planalto Meridional possui uma densidade média predominante de 2,97 g/cm³, com poucas variações de densidade em sua extensão, o que condiz com as características geomorfológicas dessa unidade,

a qual pertence ao domínio morfoestrutural das bacias e coberturas sedimentares, com origem de formação no empilhamento de sucessivos derrames basálticos intercalados por camadas de arenito. Na região geomorfológica da *Cuesta do Haedo*, se observam características de densidade dos materiais semelhantes à região do Planalto Meridional, concordando com as características geomorfológicas dessa unidade: área resultante de erosão diferencial, com resquícios do Planalto Meridional; apresenta uma densidade média predominante de 2,97 g/cm³; com variações da densidade para 2,22 g/cm³ nas áreas cortadas por recursos hídricos (limite noroeste do estado). A região da Depressão Central apresenta densidade média de 2,43 g/cm³, variando para 2,22 g/cm³ nas áreas com corpos d'água, sendo uma região formada por rochas sedimentares, com topografia suave. Quanto à Planície Costeira, pode-se observar que é uma região homogênea em toda sua extensão quanto à densidade dos materiais, acompanhando suas características geomorfológicas (formação dinâmica, decorrente dos processos sedimentares marinhos), apresentando uma densidade média de 2,22 g/cm³; nota-se que essa é a região com a menor densidade média dentre as unidades geomorfológicas presentes no RS. Por fim, o Escudo cristalino, unidade que apresenta características geomorfológicas complexas (formado por rochas ígneas, apresenta relevo ondulado com grande variação altimétrica e alta complexidade geológica) contém grande variação das densidades dos materiais que compõem o solo da região, podendo-se notar abruptadas variações da densidade ao longo de sua extensão.

Realizou-se também uma análise complementar considerando as precisões das altitudes das estações SAT-RN. Tal procedimento teve como finalidade calcular o erro médio quadrático envolvido no valor da altitude geoidal obtida pela diferença entre as altitudes geométrica e normal-ortométrica. Com isso, posteriormente, foi verificado se a altitude geoidal calculada pelo MAPGEO2015 (N_MG2015) estava contida no intervalo de confiança da altitude geoidal N, admitido pelas precisões das altitudes geométricas e normais-ortométricas. Ratificando, o intervalo de confiança de

N é dado pela altitude geoidal (N) mais ou menos o erro médio quadrático (EMQ). Conforme citado na metodologia, a precisão das altitudes normais-ortométricas das estações pertencentes a ramais foi considerada igual à pior precisão da amostra (8 cm), pois tal informação se faz necessária no cálculo do EMQ, segundo apresentado na equação 1.

A partir dessa análise complementar, verificou-se que a altitude geoidal N_MG2015 estava contida no intervalo de confiança estipulado para 8 das 33 estações; por consequência, a altitude geoidal N_MG2015 de 25 estações estava fora desse intervalo. Através dessa constatação, foi feita uma análise do quão distante os valores dessas altitudes geoidais N_MG2015 estavam do intervalo de confiança para passarem a estar contidas. Essa análise teve a finalidade de verificar se haveria significativo aumento na convergência das altitudes geoidais N_MG2015, quando comparadas ao intervalo de confiança calculado individualmente para cada estação de referência SAT-RN. Com isso, verificou-se que a menor distância encontrada foi de 1 cm para 2 estações e a maior de -43 cm para 1 estação. A média da distância das 25 altitudes geoidais não contidas no intervalo de confiança foi igual a 10 cm e o respectivo desvio-padrão igual a 14 cm, o que demonstra grande variação dos dados analisados.

Por fim, foram analisados separadamente a amplitude, a média e o desvio-padrão – tanto para as diferenças diretas como para as diferenças avaliadas estatisticamente em relação ao intervalo de confiança – para cada unidade geomorfológica do estado. Na Tabela 2 encontram-se sintetizadas as informações referentes à análise das diferenças diretas.

Tabela 2 – Estatísticas das unidades geomorfológicas.

Unidade geomorfológica	Nº Estações SAT-RN	Amplitude (cm)	Média (cm)	Desvio-Padrão (cm)
Planalto Meridional	11	83	15	24
<i>Cuesta do Haedo</i>	3	6	6	3
Depressão Central	10	38	11	11
Escudo cristalino Sul-Riograndense	6	77	11	27
Planície Costeira	3	24	18	12

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir da interpretação da Tabela 2, verifica-se que no Planalto Meridional foram encontradas grandes variações nos valores de discrepâncias das 11 estações presentes nessa unidade. A diferença direta apresentou variação de -49 cm até 34 cm, ou seja, uma amplitude de 83 cm, com média de diferenças de 15 cm e desvio padrão de 24 cm. Analisando as distâncias de N_MG2015 para o intervalo de confiança de N, verificou-se que apenas 1 dado amostral encontra-se dentro do intervalo calculado, ou seja, as demais 10 estações apresentam altitudes geoidais fora do intervalo. Frente a esses dados, pode-se afirmar que os resultados obtidos pelo modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015 apresentam grandes oscilações para essa região, em relação às observações da rede altimétrica.

No que se refere à *Cuesta do Haedo*, conforme a Tabela 2, foram analisados 3 dados amostrais presentes nessa unidade geomorfológica. A diferença direta apresentou variação de 2 cm até 8 cm, com respectiva amplitude de 6 cm, média de diferenças de 6 cm e desvio padrão de 3 cm. Analisando as distâncias de N_MG2015 para o intervalo de confiança de N, verificou-se que todas as estações estavam contidas no intervalo de confiança calculado. Sendo assim, pode-se afirmar que, nessa região, os resultados obtidos pelo modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015 apresentam coerência, quando comparado às observações da rede altimétrica.

Em relação à Depressão Central há 10 estações SAT-RN presentes nessa região. Segundo a Tabela 2, as diferenças diretas variaram entre 0 cm

e 38 cm, resultando em uma amplitude de 38 cm, com média das diferenças e desvio padrão, ambos, iguais a 11 cm. Analisando a distância de N_MG2015 para o intervalo de confiança de N dessas estações foram encontradas 4 estações dentro do intervalo e, conseqüentemente, 6 estações fora do mesmo. Diante disso, percebe-se que, para essa unidade, o modelo converge parcialmente com os dados adotados como referência, pois apresenta conformidade com as oscilações das diferenças nessa região. Analisando-se as estações e suas peculiaridades, percebe-se que as duas estações com maiores valores de discrepâncias encontram-se em áreas de transição da Depressão Central para outras unidades geomorfológicas; casos da estação SAT91938 – RN1941N, que se encontra entre a Depressão Central e a *Cuesta do Haedo*, e da estação SAT93774 – RN1953B, que se localiza entre a Depressão Central e o Escudo cristalino. Retirando-se essas duas estações da análise estatística, obtém-se uma média de 6 cm e um desvio-padrão de 4 cm.

Ao analisar-se a Tabela 2, verifica-se que no Escudo cristalino foram encontradas 6 estações SAT-RN. A diferença direta apresenta variação de -41 cm até 36 cm, isto é, uma amplitude de 77 cm, com média de diferenças de 11 cm e desvio-padrão de 27 cm. Estatisticamente verificou-se que nenhum dado amostral encontra-se dentro do intervalo de confiança calculado para N. Sendo assim, pode-se afirmar que o modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015, para essa região, não convergiu com os dados de referência adotados, uma vez que há grande variação para as diferenças calculadas em relação às observações da rede altimétrica. Destaca-se que a região do Escudo cristalino apresenta grandes oscilações altimétricas. No entanto, apenas uma estação apresentou diferença negativa entre as altitudes geoidais; trata-se da estação POAL, que se for retirada da amostra altera significativamente os resultados do desvio-padrão (que passa para 9 cm) e da média (que altera para 22 cm). Ainda, observa-se que a retirada das informações dessa estação resulta em uma maior coerência para os dados da região, apesar de aumentar a média, diminui consideravelmente o desvio-padrão em relação a essa.

Por fim, a Planície Costeira apresenta 3 estações SAT-RN, bem

distribuídas espacialmente, uma ao norte, uma ao centro e outra ao sul dessa unidade. Analisando a Tabela 2, as diferenças diretas entre as altitudes geoidais apresentam variação de 6 cm até 30 cm, com respectiva amplitude de 24 cm, média de diferenças de 18 cm e desvio-padrão de 12 cm. Quanto ao intervalo de confiança calculado para N dessa unidade geomorfológica, verifica-se que nenhuma das estações está contida no mesmo. Espacialmente, para a região da Planície Costeira, observa-se um vetor de aumento das diferenças diretas no sentido norte-sul (proporcional ao aumento da distância do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba/SC), e que os resultados da análise do modelo apresentam semelhante vetor (menor convergência no sentido norte-sul). Sendo assim, pode-se afirmar que, para a Planície Costeira, o modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015 apresenta parcial convergência com os dados de referência adotados, sendo que esta diminui com o aumento da latitude.

Em síntese, comparando as unidades geomorfológicas verifica-se que o Planalto Meridional e a Depressão Central apresentam número aproximado de estações em suas extensões; entretanto, o Planalto Meridional apresenta apenas uma estação contida no intervalo de confiança de N, sendo que a Depressão Central apresenta 4 estações, o que pode estar relacionado aos diferentes cenários topográficos dessas unidades. Na mesma linha, a *Cuesta do Haedo* e a Planície Costeira apresentam o mesmo número de estações, no entanto a convergência do modelo geoidal MAPGEO2015 se mostra maior para a primeira unidade, pois todas as estações dessa região estão contidas no intervalo de confiança calculado para N. Essas unidades geomorfológicas apresentam características semelhantes em relação à topografia (baixa variação altimétrica), por outro lado, a Planície Costeira apresenta uma maior extensão territorial no sentido norte-sul (grande variação em latitude). O Escudo cristalino Sul-Riograndese, por sua vez, é a unidade geomorfológica que apresenta a maior complexidade geológica entre as unidades, fato que auxilia na menor convergência entre as altitudes geoidais analisadas nessa região e, por consequência, na maior variação dos valores de discrepâncias.

Para finalizar, nota-se que a Depressão Central é uma região de transição para as demais unidades geomorfológicas, agregando assim características dessas unidades em sua extensão; sendo a unidade que apresenta maior coerência do MAPGEO2015 com os dados de referência usados para o estado do RS, apresentando similares resultados estatísticos (média e desvio-padrão).

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados e das discussões abordadas, conclui-se que os objetivos propostos nesse estudo foram alcançados, uma vez que o modelo geoidal MAPGEO2015 foi analisado para o estado do Rio Grande do Sul e para suas diferentes regiões geomorfológicas. Considerando-se as dificuldades de manutenção, densificação e localização dos marcos da rede altimétrica do IBGE e o avanço tecnológico para obtenção de modelos geoidais, cada vez mais precisos, nota-se que há um aumento da utilização nas práticas de levantamentos de modelos geoidais em substituição às técnicas convencionais de determinação das altitudes normais-ortométricas.

Nesse estudo analisou-se a coerência entre o modelo geoidal do IBGE em sua realização de 2015 (MAPGEO2015) e os dados de referência das estações SAT-RN. Para tanto, adotou-se como verdadeira as altitudes geoidas resultantes das missões de nivelamento geométrico e rastreamento GNSS realizadas pelo IBGE, utilizando as mesmas como referência para a análise da coerência do MAPGEO2015. Ressalva-se que os dados das estações SAT-RN podem conter erros inerentes a problemas com o nivelamento geométrico e medidas de gravidade esparsas ou pouco densificadas, as quais degradam a exatidão das mesmas. A metodologia deste trabalho compara a convergência entre essas duas técnicas de determinação da altitude geoidal e não a qualidade de um método em detrimento ao outro, verificando em quais regiões do estado do RS as mesmas convergem.

Nesse sentido, comprovou-se que o modelo converge para algumas regiões do estado (extremo oeste, centro e nordeste) e para outras regiões (sul, sudeste, norte e noroeste) apresenta maiores diferenças em relação aos dados de referência adotados.

A forma e a qualidade na determinação das informações da rede altimétrica brasileira atribuíram credibilidade aos monumentos componentes do Sistema Geodésico Brasileiro, tornando seu uso habitual pela comunidade geodésica nacional. Devido à precisão atual dos modelos geoidais ainda não ser compatível com a precisão da técnica de nivelamento geométrico, é inegável a resistência da comunidade em geral para essa iminente troca, ou seja, utilizar modelos de ondulação geoidal em substituição aos marcos de referência altimétrica. No entanto, neste momento, a mesma confiabilidade não pode ser atribuída ao modelo geoidal MAPGEO2015. As técnicas clássicas de determinação de altitudes não podem ser substituídas ainda, por completo, em todas as regiões do RS e para todas as finalidades, pelas técnicas de posicionamento GNSS associadas ao modelo geoidal MAPGEO2015, pois esse modelo apresenta limitações quanto às regiões do estado e à precisão pretendida pelo usuário.

Conforme apontado nesse estudo, em certas regiões do RS, como a região central, a utilização do modelo geoidal MAPGEO2015 apresenta convergência com os dados de referência, o que aponta a possibilidade de utilização de suas informações em concomitância com as informações da rede ou, até mesmo, em substituição da mesma (em decorrência da degradação desta). Já, para os trabalhos realizados na região da Depressão Central, pode-se adotar o modelo MAPGEO2015 para a obtenção de altitudes normais-ortométricas, sempre observando a precisão final pretendida para essa informação, uma vez que as diferenças encontradas entre as altitudes geoidais obtidas por meio das duas técnicas convergem.

É necessário destacar que algumas estações SAT-RN, componentes da rede, apresentam informações aparentemente equivocadas, sendo necessária uma verificação das observações das mesmas, como apontado no caso da

estação POAL. As dificuldades de manutenção da rede (não garantia da estabilidade física dos marcos, quanto ao que se refere à localização como à estrutura dos monumentos) e os problemas inerentes às atividades de campo, podem tornar o uso de modelos de ondulação geoidal mais atrativo.

Diante do exposto considera-se que o modelo de ondulação geoidal do Brasil necessita melhorar no estado do RS e sua utilização deve estar condicionada à precisão final que o usuário deseja obter. Nessa linha, pode-se avaliar as possibilidades de integração e utilização do modelo geoidal MAPGEO2015, segundo a necessidade e a finalidade do usuário. Por exemplo, a utilização desse modelo de ondulação para o planejamento de redes de drenagem não se mostra adequado, ainda mais quando se tratam de regiões planas como, por exemplo, a Planície Costeira, onde pequenas variações na altitude causam grandes interferências no planejamento destas. No entanto, tais informações podem servir como complemento técnico ou como suporte à decisão para o planejamento de redes em regiões onde há significativas variações da topografia local.

Por fim, enfatiza-se que o modelo geoidal MAPGEO2015 pode ser adequado em diferentes atividades, que demandem precisões decimétricas, como: ortorretificação de imagens, a partir de observações oriundas de receptores GNSS; detecção de obstáculos em cones de aproximação de zonas de proteção de aeródromos; obtenção de Modelos Digitais de Terreno para fins diversos (projetos de movimentação de terra, corte e aterro, planos funcionais, etc.); entre outras atividades, em que o modelo atenda a precisão requerida pelo usuário.

Referências

ARANA, D.; PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; GUIMARÃES, G. N. Errors measurement of interpolation methods for geoid models: study case in the Brazilian region. **Bulletin of Geodetic Sciences**, vol. 24, issue 1, 2018. pp. 44-57.

- ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL. Site <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/hipsometria-e-unidades-geomorfologicas>>, acessado em junho de 2017.
- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C. de; MACHADO, W. C.; NUNES, M. A.; LENG RUBER, N. V.; XAVIER, E. M. L.; FORTES, L. P. S. MAPGEO2015: o novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.68/10, 2016. pp. 1873-1884.
- FORTES, A. R.; CONSENTINO, K. B. **Mapa de variações das densidades laterais topográficas para o estado do Rio Grande do Sul**. Relatório Técnico-Científico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. 15p.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319 p.
- GOLDEN SOFTWARE. Site <<http://www.goldensoftware.com/products/surfer>>, acessado em junho de 2017.
- GONÇALVES, J. M. S.; SANTOS, N. M. dos. Análise das classificações do relevo para o Rio Grande do Sul. **Boletim Gaúcho de Geografia**, 13, 1985. pp. 3-20. Site <<http://www.seer.ufrgs.br/bgg/article/viewFile/37791/24379>>, acessado em junho de 2017.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011. **Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro – Relatório**. Site <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorioajustamento.pdf>, acessado em maio de 2018.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017a. **Modelo de Ondulação Geoidal**. Site <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm>, acessado em maio de 2017.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017b. **Geociências**. Site <https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>, acessado em junho de 2017.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015a. **Discrepâncias entre o MAPGEO2015 e os pontos de conexão GNSS x RN**. Site

<ftp://geoftp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/discrepancias_MAPGEO2015.pdf>, acessado em maio de 2017.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015b. **O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015.** Site <ftp://geoftp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/rel_mapgeo2015.pdf>, acessado em abril de 2018.

PAVLIS, N. K.; HOLMES, S. A.; KENYON, S. C.; FACTOR, J. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). **Journal of Geophysical Research**, vol. 117, B04406, 2012.

SOUZA, S. F.; MATSUOKA, M. T.; SEVERO, T. C.; GAGG, G. **Rede GPS para aplicações no aprimoramento de geóides gravimétricos e apoio geodésico no estado do Rio Grande do Sul.** Relatório Técnico-Científico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. 83p.

WANG, Y. M.; SALEH, J.; LI, X.; ROMAN, D. R. The US Gravimetric Geoid of 2009 (USGG2009): model development and evaluation. **Springer-Verlag**, 86, 2011. pp. 165-180.