



**Atualização da Estrutura Gravimétrica do Estado de São Paulo:  
Vínculo ao Sistema Gravimétrico de Referência**  
Gravimetric Structure Update of São Paulo State: Link to the  
Observations of the Gravimetric Reference System

Valéria Cristina Silva<sup>1</sup>; Denizar Blitzkow<sup>1,2</sup>; Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho<sup>1</sup>;  
Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos<sup>2</sup> & Iuri Moraes Bjorkstrom<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2, 83, prédio Engenharia Civil, Cidade Universitária, 05508-070, São Paulo, SP, Brasil

<sup>2</sup>Centro de Estudos de Geodesia, Rua Cotoxó, 611, Conjunto 75, Perdizes, 05021-000, São Paulo, SP, Brasil  
E-mails: vsilva2@usp.br; dblitzko@usp.br; flavio vaz@usp.br; acocmatos@gmail.com; bjorkstrom@usp.br

Recebido em: 06/03/2020    Aprovado em: 06/06/2020

DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_3\\_215\\_226](http://doi.org/10.11137/2020_3_215_226)

## Resumo

A referência ainda utilizada para a maioria dos dados gravimétricos do mundo é a *International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN-71)*. Estima-se que esta rede, estabelecida por gravímetros relativos e dispositivos pendulares, possui precisão de  $100 \mu\text{Gal}$ . Em função do surgimento e da comercialização dos gravímetros, baseados em interferometria a laser, queda-livre e supercondutores, tornou-se possível determinar a aceleração de gravidade ( $g$ ) com precisão inferior a  $10 \mu\text{Gal}$ . Esse e outros avanços tecnológicos fez com que a *International Association of Geodesy (IAG)* estabelecesse convenções direcionadas a padronizar e a homogeneizar mundialmente os sistemas altimétrico e gravimétrico. O presente trabalho tem como objetivo analisar e quantificar a conexão das medições absolutas do Sistema Gravimétrico de Referência (SGR) à estrutura gravimétrica do estado de São Paulo. A conexão das observações absolutas revelou uma discrepância máxima de  $250 \mu\text{Gal}$ . Por outro lado, mais de 80% das observações se encontram com diferença inferior a  $100 \mu\text{Gal}$ . A influência dos resultados sobre as anomalias de Bouguer e de ar-livre é apresentada.

**Palavras-chave:** *Aceleração de gravidade; Rede gravimétrica; SGR*

## Abstract

The reference still used for most gravimetric data in the world is the *International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN-71)*. It has been estimated that this network, established by relative gravity meters and pendulum devices, has an accuracy of  $100 \mu\text{Gal}$ . Due to the advent and the commercialization of gravity meters, based on laser interferometry, free fall and superconductors, it became possible to determine the acceleration of gravity with accuracy below  $10 \mu\text{Gal}$ . This and other technological advances have led the *International Association of Geodesy (IAG)* to establish resolutions aimed at standardizing and homogenizing worldwide the altimetric and gravimetric systems. The present work aims to analyze and quantify the connection of absolute measurements of the Sistema Gravimétrico de Referência (SGR) to the gravimetric structure of the state of São Paulo. The connection of the absolute observations revealed a maximum discrepancy of  $250 \mu\text{Gal}$ . On the other hand, more than 80% of the observations are lower than  $100 \mu\text{Gal}$ . The influence of the results on Bouguer and free-air anomalies is presented.

**Keywords:** *Gravity acceleration; Gravimetric network; SGR*

## 1 Introdução

Monitorar e investigar as mudanças da Terra com alta precisão e resolução de forma consistente, homogênea e com estabilidade são os principais objetivos da Geodesia moderna, estabelecidos pelas recentes resoluções da *International Association of Geodesy* (IAG). Nesse contexto, em 2003 a IAG criou o *Global Geodetic Observing System* (GGOS) a fim de prover uma infraestrutura geodésica para monitorar o sistema Terra e auxiliar na detecção de fenômenos, como as variações do nível médio do mar, deslocamento de massas e processos associados ao fluxo de fluidos.

Em 2015, a IAG emitiu duas resoluções a fim de definir e realizar o *International Height Reference System* (IHRS) e estabelecer o chamado *International Gravity Reference System* (IGRS). O IGRS é necessário para que as informações gravimétricas sejam referenciadas a um padrão comum, designado por observações gravimétricas absolutas (Torge, 2001). A referência mundial, ainda utilizada, é a *International Gravity Standardization Net 1971* (IGSN-71), oriunda de uma série de medições conduzida em sua maior parte por gravímetros relativos e dispositivos pendulares. Estima-se que as determinações gravimétricas referidas a essa rede apresentem precisão em torno de  $100 \mu\text{Gal}$  (Wilmes *et al.*, 2015).

A rede gravimétrica de referência no Brasil, denominada Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB), foi originada a partir de 20 observações da IGSN-71 (ON, 1986). Somente no final da década de 1980, sete determinações absolutas da aceleração de gravidade foram estabelecidas com o gravímetro absoluto JILAG-3 em parceria com a Universidade de Hannover, dando origem a chamada Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas (RENEGA) (Gemael, 2012). No ano de 2006 o Observatório Nacional (ON) (Sousa & Santos, 2010) adquiriu um gravímetro absoluto Micro-g Lacoste A10, número #11, e contribuiu com 20 estações absolutas no país (BGI, 2019). No entanto, devido ao pequeno número de estações, diversos levantamentos relativos foram conduzidos tendo como referência as estações pertencentes à IGSN-71 (Piña & Sousa, 2001).

O estado de São Paulo possui uma adequada cobertura gravimétrica conforme o recomendado pela IAG para a realização do IHRS. Os primeiros levantamentos foram conduzidos a partir da década de 70 por diferentes instituições, como destacado por Castro Júnior *et al.* (2018). Em 2008, o projeto temático número 06/04008-2, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, contribuiu com levantamentos gravimétricos de densificação, destinados à produção de um modelo geoidal avançado.

No ano de 2016 foi implantado um Sistema Gravimétrico de Referência no Estado de São Paulo (SGR/SP), a partir de uma iniciativa do Laboratório de Topografia e Geodesia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTG/EPUSP) e do do Centro Estudos de Geodesia (CENEGEO) e do Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo (IGCSP). Esse sistema contém 15 novas estações e quatro medições sobre estações já mensuradas pelo ON. As medições foram realizadas utilizando um gravímetro absoluto Micro-g LaCoste, A-10, número #32, pertencente ao IGC, em operação no LTG.

Baseando-se nos pressupostos das resoluções da IAG, com vistas ao estabelecimento de um sistema geodésico global homogêneo e preciso, esse trabalho tem como objetivo analisar e quantificar a conexão das estações absolutas do SGR-SP à estrutura gravimétrica do Estado de São Paulo. Uma avaliação da influência das discrepâncias encontradas com a substituição da rede IGSN-71 sobre as anomalias de ar-livre e de Bouguer é apresentada.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 *International Gravity Reference System*

O estabelecimento do IGRS é contemplado na resolução número 2 da IAG (2015), motivada pelo GGOS. Recomenda-se às instituições internacionais e nacionais e agências responsáveis pela infraestrutura geodésica a estabelecer um conjunto de estações de referência a nível nacional; efetuar observações absolutas da aceleração de gravidade nessas estações; participar de comparações de gravímetros absolutos para garantir sua compatibilidade e tornar os resultados das medições disponíveis em plataforma aberta (IAG, 2019).

Na definição e realização do IGRS espera-se o alcance da precisão entre  $1$  a  $2 \mu\text{Gal}$  na mensuração da aceleração de gravidade (Wilmes *et al.*, 2015); ressalta-se que baseado na tecnologia existente, essa precisão é considerada otimista. Nesse sentido, estratégias estão sendo traçadas por centros de metrologia e de comparação para garantir a padronização e a reprodução das medidas da aceleração de gravidade. O *Consultative Committee for Mass and related quantities* (CCM) e a IAG estão no encargo da coordenação das atividades.

Dois métodos foram propostos para garantir e promover a reprodução das medidas de aceleração de gravidade com gravímetros absolutos. No primeiro método os equipamentos realizam medições independentes através da calibração da frequência do laser e do relógio de referência. Já o segundo método visa realizar a calibração do gravímetro por meio de uma comparação mediante um gravímetro de referência ou uma estação de referência (Marti *et al.*, 2014).

## 2.2 Anomalias de Gravidade

As aplicações que envolvem a aceleração de gravidade visam estudar e determinar os modelos geoidal e quase geoidal. A determinação do primeiro segue a metodologia de Stokes (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006), recorrendo-se às reduções gravimétricas a fim reduzir  $g$  à superfície geoidal. Ao passo que na visão moderna, determina-se o segundo seguindo o princípio de Molodensky.

A forma como se trabalham as massas acima do geoide leva a diferentes tipos de reduções gravimétricas que dão origem às anomalias. Dentre essas, as mais utilizadas são as anomalias de ar-livre e de Bouguer.

Na definição clássica, a anomalia de ar-livre ( $\Delta g_{fa}$ ), equação (2), é determinada introduzindo a correção ar-livre ( $C_{fa}$ ) para reduzir  $g$  ao nível médio do mar. Em geral,  $C_{fa}$  é obtido pelo gradiente de gravidade normal de 0,3086 mGal em função da altitude ortométrica ( $H$ ), conforme a expressão (1) (Gemael, 2012).

$$C_{fa} = 0,3086H \quad (1)$$

Logo, a anomalia ar-livre é determinada como:

$$\Delta g_{fa} = g + 0,3086H - \gamma \quad (2)$$

onde,  $\gamma$  é a aceleração de gravidade normal calculada na superfície elipsoidal em função da latitude do ponto.

Uma característica das anomalias ar-livre é a dependência da topografia, visto que um dos fatores responsáveis pela variação da aceleração de gravidade são os efeitos das massas topográficas.

A determinação da anomalia de Bouguer ( $\Delta g_B$ ) pressupõe a remoção das massas topográficas externas ao geoide, denominado platô de Bouguer ( $A_B$ ). Para tanto, é introduzida uma correção, expressão (3), considerando que o terreno ao entorno da estação gravimétrica é horizontal e plano e a densidade das massas entre as superfícies geoidal e física seja constante, com o valor de  $\rho = 2,67 \text{ gcm}^{-3}$  (Vermeer, 2018).

$$A_B = 2\pi k \rho H = 0,1119H \text{ mgal} \quad (3)$$

em que,  $k$  é a constante gravitacional, equivalente a  $6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ .

A anomalia de Bouguer é obtida aplicando a correção referente ao platô de Bouguer (3) e a correção de ar-livre (1), conforme a expressão (4):

$$\Delta g_B = g - A_B + C_{fa} - \gamma \quad (4)$$

em que,  $\gamma$  é aceleração de gravidade normal referenciada à superfície elipsoidal.

Considerando as correções de ar-livre ( $C_{fa}$ ) e de Bouguer ( $A_B$ ) sendo respectivamente 0,0119 e 0,3086 mGal em relação a altitude, a anomalia de Bouguer é definida pela expressão (5).

$$\Delta g_B = g - 0,1119H + 0,3086H - \gamma = g + 0,1967H - \gamma \quad (5)$$

Na Geodesia, a principal aplicação da anomalia de Bouguer é para a conversão entre as superfícies geoidal e quase geoidal. Já na geofísica  $\Delta g_B$  é uma importante ferramenta para a detecção de informações geológicas.

## 2.3 Determinações Gravimétricas

Dois casos são considerados para as observações da aceleração de gravidade: determinações absolutas e relativas. A primeira refere-se à mensuração de  $g$  baseando-se em padrões de comprimento e tempo, enquanto a segunda proporciona a diferença de  $g$  entre estações. O instrumento empregado para aquisição de dados gravimétricos é denominado gravímetro. As referências e grandezas físicas envolvidas no processo de medição caracterizam os gravímetros em relativos e absolutos.

O termo rede é designado ao conjunto de determinações gravimétricas relativas, vinculadas ao valor de  $g$  de uma estação de precisão superior. Os valores finais dessas estações são usualmente determinados por algum método de ajustamento de observações. Esse é o caso das redes gravimétricas IGSN-71, RGBF, da linha de calibração Agulhas Negras, dentre outras. As demais informações gravimétricas constituem um sistema, como o SGR-SP, ou apenas pontos gravimétricos determinados com finalidades específicas, como os levantamentos de densificação.

Reitera-se que é importante e necessário que as determinações gravimétricas sejam derivadas de um sistema de referência global de gravidade, para que haja padronização das informações e a possibilidade de compatibilização de dados com outros países.

O sistema de referência de gravidade é implementado com gravímetros de alta precisão, como os absolutos, e é o fundamento para os trabalhos de densificação gravimétrica. O mesmo serve de referência para as redes relativas, para a calibração de gravímetros relativos e no auxílio aos estudos de variação da aceleração de gravidade com o tempo. Com as novas propostas da IAG, o conjunto de observações absolutas de  $g$  constitui o IGRS.

As estações que compõem a rede relativa de referência são mensuradas por gravímetros relativos com precisão nominal de  $50 \mu\text{Gal}$ . As medições são conduzidas em referências materializadas, com os valores finais comumente ajustados pelo método dos mínimos quadrados e identificados para a utilização em outros levantamentos.

As determinações de densificação, realizadas via medições relativas, tem fundamental importância na produção de modelos geoidal e quase geoidal uma vez que retrata o comportamento do campo de gravidade. A distância espacial entre as medições fica entre 5 a 10 km na América do Sul e Central. Em outros países como os Estados Unidos da América e Canadá, a mesma pode ser de até 1 km. Esse conjunto de pontos é formado por circuitos, podendo ter o formato de polígonos ou linhas cujos pontos inicial e final devem ser uma estação gravimétrica de ordem superior (Castro Júnior, 2005). A materialização dos locais de medição não é necessária, porém, é importante a determinação das coordenadas a fim de aplicá-las nas formulações do Problema de Valor de Contorno Geodesia (Guimarães & Blitzkow, 2011).

### 3 Material e Método

#### 3.1 Observações Absolutas da Aceleração de Gravidade

As informações gravimétricas foram atualizadas a partir de nove estações (Tabela 1) do SRG-SP (Figura 1). Os valores de  $g$  foram reduzidos da referência na câmara de queda-livre ao ponto de medição, utilizando o gradiente ar-livre da Terra normal (0,3086 mGal/m), em função da altura de transferência de 70,5 cm do gravímetro A10, número #32.

A estabilidade e a acurácia do gravímetro absoluto A10, número #32, interesse do presente estudo, é assegurada pelas constantes manutenções realizadas pela Micro-g LaCoste. Uma estação de referência situada no interior

da fábrica possui o valor de  $g$  determinado dentro das recomendações metroológicas. Dessa forma, o A10, número #32 é certificado a partir da comparação da medição realizada pelo mesmo e o valor de  $g$  estabelecido em um pilar por outros gravímetros.

#### 3.2 Conexão da Estrutura Gravimétrica de São Paulo ao SGR

A atualização das informações gravimétricas consistiu no reprocessamento dos dados originais de campo, substituindo as estações de referência vinculadas à IGSN-71 pelas observações do SGR-SP. Na ausência dos arquivos brutos do levantamento aplicou-se uma correção aos valores de  $g$ , correspondente à discrepância encontrada na conexão da estação de referência utilizada nas determinações, a uma estação absoluta.

As informações gravimétricas provenientes do projeto temático constituem o principal material deste trabalho uma vez que se trata de informações recentes, sendo possível seu reprocessamento. O estado de São Paulo possui até o momento 9.257 determinações gravimétricas. Cerca de 3.800 foram resultado do projeto temático e o restante observado por instituições públicas e privadas, tais como, Instituto de Geografia e Estatística (IBGE), Petrobrás, ON e o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP) (Guimarães, 2010). Parte desses dados precedem à década de 1990, enquanto outros foram observados recentemente com fins específicos. A atualização dos mesmos não foi possível por completo em razão da dificuldade de identificar as estações utilizadas como referência nos antigos levantamentos.

Nome	Ano	$g$ ( $\mu\text{Gal}$ )	Precisão ( $\mu\text{Gal}$ )
Cananéia	2015	978.934.212	11,89
Dracena	2016	978.583.040	10,90
Jaboticabal	2013	978.512.661	10,72
Lins	2013	978.589.261	11,61
Ourinhos	2016	97.638.570	11,72
São José do Rio Preto	2013	978.516.283	13,08
Presidente Prudente	2016	978.606.283	10,87
São Paulo	2018	978.641.826	11,06
Valinhos	2018	978.563.661	10,75
<b>Média</b>			11,40
<b>Desvio Padrão</b>			0,72

Tabela 1 Observações utilizadas do SRG-SP (CENEGEO, 2019).

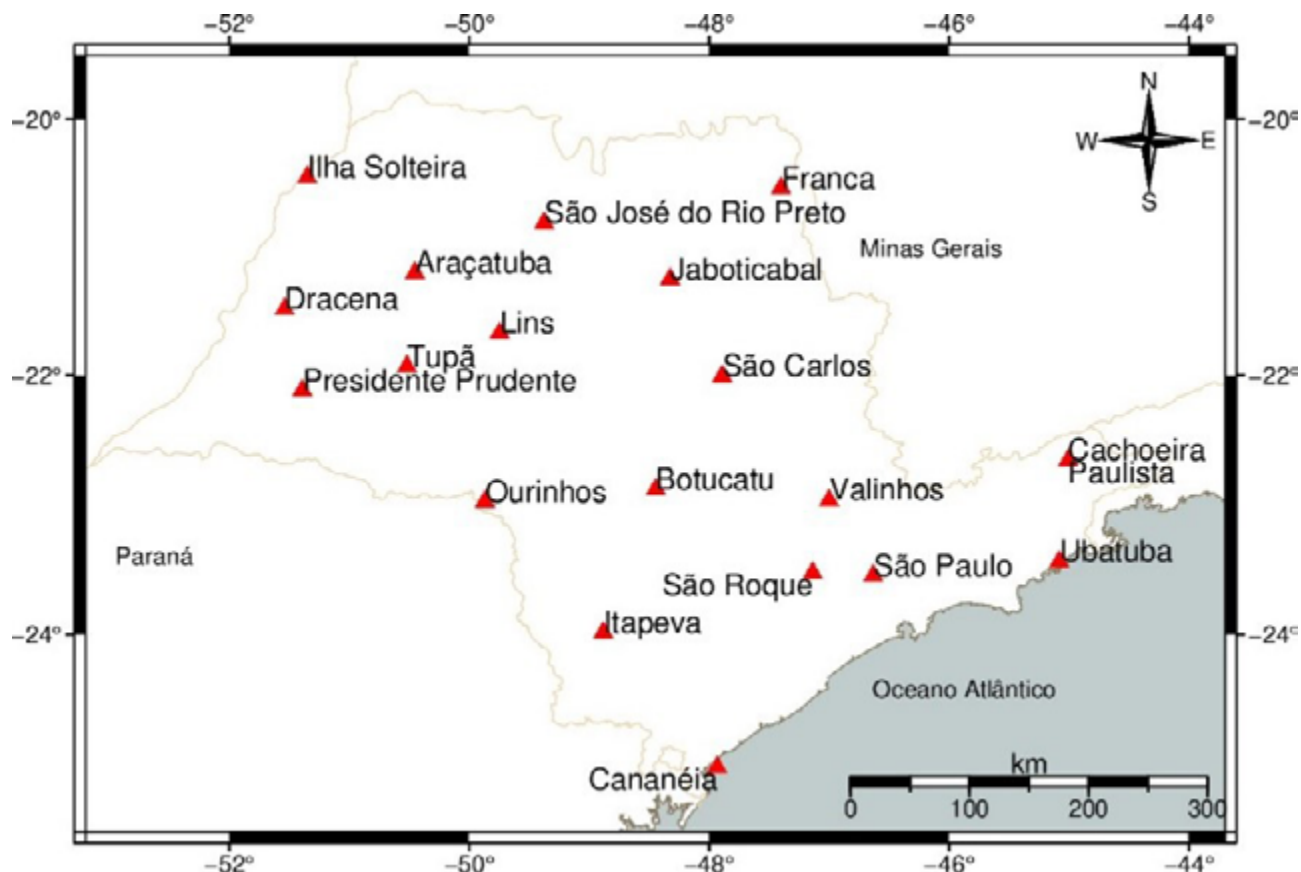


Figura 1 Sistema Gravimétrico de Referência.

Os arquivos de densificação gravimétrica, disponibilizados em formato .grv ou .date, foram reprocessados no software GravSur, desenvolvido por Amarante (2012).

Em primeira instância, identificaram-se as estações utilizadas como ponto de partida e chegada em cada levantamento. Quando necessário foi realizada a correção dos parâmetros, como o fuso, o fator de escala, a tabela do fator de calibração do gravímetro e as correções referentes à deriva e à atração lunisolar.

O reprocessamento dos dados gravimétricos baseando-se no valor de  $g$  das estações do SRG-SP foi possível visto que algumas campanhas partiram do valor absoluto de  $g$  da estação de São Paulo. Durante o levantamento é usual medir estações relativas previamente determinadas a fim de conferir a consistência das medições. Dessa forma, as mesmas passam a estar conectadas a uma estação absoluta, tornando possível atualizar os pontos de densificação em levantamentos em que tais estações relativas

se tornam a referência. Os dados que não apresentaram a referida conexão foram selecionados para um levantamento de campo. O esquema da atualização a partir de uma estação absoluta (São Paulo) é apresentado na Figura 2, utilizando as campanhas de Assis, Itatinga e Piratininga.

A atualização dos dados gravimétricos precedentes ao projeto temático consistiu na investigação dos pontos de referência utilizados no levantamento, a partir do contato de pessoas que participaram das campanhas gravimétricas. Dessa forma, as medições da densificação foram atualizadas baseando-se na discrepância encontrada na conexão da estação de referência a uma estação do SGR-SP.

Os levantamentos gravimétricos para a conexão dos pontos de referência às estações absolutas foram conduzidos com os gravímetros L&R e Scintrex CG5, ambos com precisão de  $50 \mu Gal$ . Para a execução dos levantamentos escolheu-se a estação absoluta mais próxima do ponto a ser mensurado.

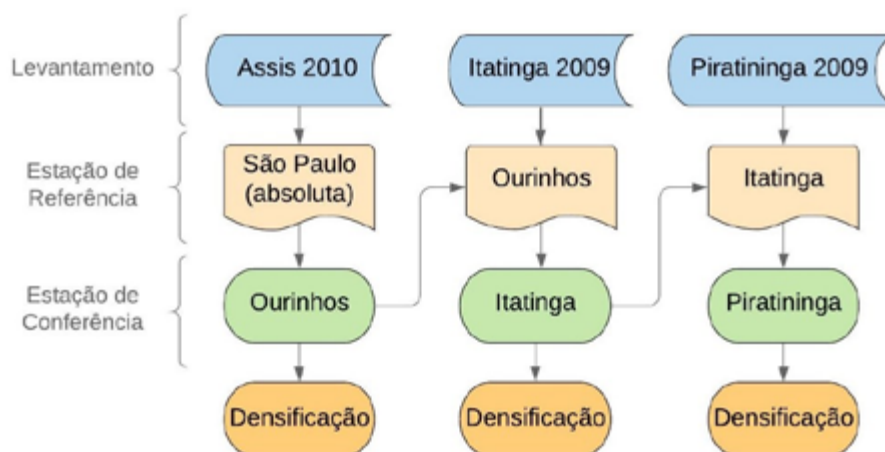


Figura 2 Esquema da atualização dos dados gravimétricos.

## 4 Resultados

### 4.1 Conexão das Informações Gravimétricas ao SGR

As discrepâncias encontradas com a atualização das estações de referência em função dos valores absolutos do SGR-SP são apresentadas na Tabela 2.

O levantamento de conexão demonstrou que 56,25% das estações relativas estabelecidas pelo ON e pelo IBGE estão dentro da precisão nominal ( $50 \mu Gal$ ) dos gravímetros utilizados. As exceções ocorreram para as estações: Estátua do Ipiranga, Frutal, Jales, Museu do Ipiranga, Presidente Epitácio, Presidente Prudente e São Carlos.

Com os valores de  $g$  da Tabela 2 e as conexões existentes na densificação gravimétrica, 4.595 pontos gravimétricos foram atualizados. As modificações nos valores de  $g$  são apresentadas na Figura 3.

A conexão dos valores absolutos às determinações evidenciou discrepâncias inferiores a  $50 \mu Gal$  para 58% das informações gravimétricas. Esses pontos não apresentaram modificações significativas, pois estão em sua maioria referidos à estação absoluta de São Paulo, a qual foi determinada anteriormente pelo ON com o gravímetro absoluto A10, número #11. A diferença do valor de  $g$  desta estação em relação às determinações realizadas pelo gravímetro absoluto A10, número #32 é de apenas  $10 \mu Gal$ . As principais modificações estão destacadas em áreas para a melhor identificação.

As informações na área 1 (Figura 3) estão referidas às estações em Presidente Prudente e Presidente Epitácio, implantadas pelo ON. O levantamento de conexão entre esses pontos e as estações absolutas (Tabela 2) revelou uma discrepância de  $130 \mu Gal$  e de  $120 \mu Gal$ , respectivamente. Já

a densificação localizada na área 4 retratam as determinações que apresentaram a maior modificação,  $250 \mu Gal$ . Essas medições foram estabelecidas tendo como referência o valor  $978.490.180 \mu Gal$  de uma estação relativa na cidade de São Carlos, atualizada para  $978.489.930 \mu Gal$  (Tabela 2).

As informações na área 2 se referem ao levantamento realizado pela Universidade de Campinas, tendo como referência a estação absoluta de Valinhos. O valor de  $g$  mensurado em 1989,  $978.563.770 \mu Gal$ , foi determinado pelo gravímetro JILAG-3. As medições recentes sobre a estação de Valinhos, local de testes para o gravímetro A10, número #32 devido à estabilidade do pilar, confirmam o valor de  $978.563.687 \mu Gal$ . A discrepância entre os dois gravímetros é de aproximadamente  $82 \mu Gal$  para essa estação. Reitera-se que o valor de  $g$  determinado pelo gravímetro JILAG-3 fez uso do gradiente local de gravidade, mensurado a partir de gravímetros relativos, podendo atribuir à medição uma incerteza de  $50 \mu Gal$  além da incerteza do próprio instrumento absoluto.

A densificação na área 3 ao sul de São Paulo está referida à estação absoluta de Cananéia. O valor de referência utilizado neste levantamento foi  $978.934.397 \mu Gal$ , disponibilizado pelo ON, utilizando o gradiente local de gravidade. Já no ano de 2015, a estação de Cananéia foi reocupada com o gravímetro A10, número #32, obtendo o valor de  $978.934.212 \mu Gal$ , reduzido da câmara de queda-livre ao solo com o gradiente ar-livre. A discrepância apresentada entre os valores absolutos é de  $185 \mu Gal$ . A causa da diferença pode estar associada às correções aplicadas no processamento do valor de  $g$ , visto que regiões próximas à costa estão sujeitas a um deslocamento vertical de até dezenas de centímetros devido à carga oceânica (Van Camp *et al.*, 2017).



**Atualização da Estrutura Gravimétrica do Estado de São Paulo: Vínculo ao Sistema Gravimétrico de Referência**

Valéria Cristina Silva; Denizar Blitzkow; Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho; Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos & Iuri Moraes Bjorkstrom

Estações relativas	g anterior $\mu\text{Gal}$	g atualizado $\mu\text{Gal}$	$\Delta g$ $\mu\text{Gal}$
Estátua do Ipiranga	978.644.990	978.644.910	80
Frutal	978.486.570	978.486.500	70
IAG- Água Funda	978.638.080	978.638.040	40
Jales	978.513.500	978.513.590	90
Leme	978.553.100	978.553.150	50
Mococa	978.526.280	978.526.240	40
Museu do Ipiranga	978.636.560	978.636.450	110
Penápolis	978.559.610	978.559.590	20
Presidente Epitácio	978.627.240	978.627.360	120
Presidente Prudente	978.596.780	978.596.650	130
Queluz	978.639.740	978.639.710	30
Registro	978.876.580	978.876.530	50
Rinópolis	978.579.980	978.579.960	20
Santa Rita do Pardo	978.577.080	978.577.090	10
São José dos Campos	978.605.580	978.605.590	10
São Carlos	978.490.180	978.489.930	250
<b>Diferença padrão</b>			63,75
<b>Média da diferença padrão</b>			70

Tabela 2 Estações relativas com conexão às estações do SGR-SP.

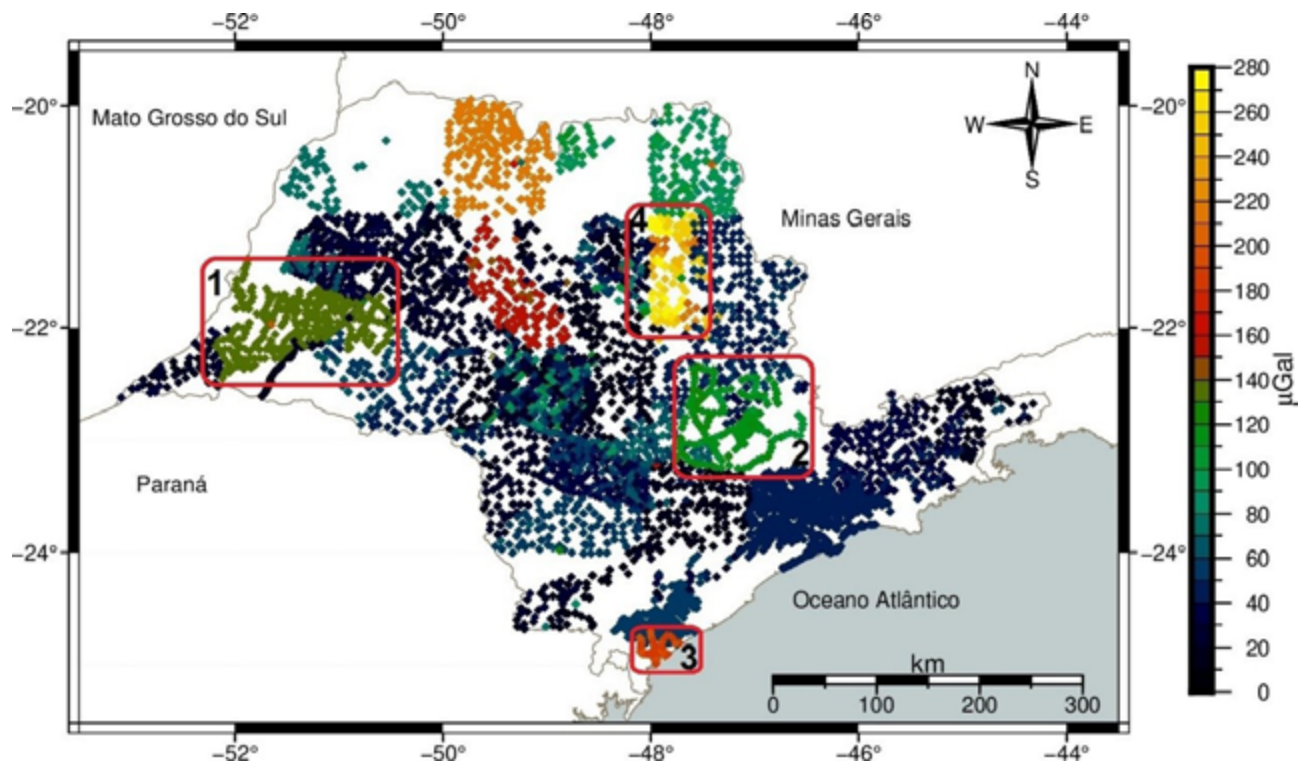


Figura 3 Substituição da referência IGSN-71 pelas estações do SGR-SP.

## 4.2 Validação dos Dados Gravimétricos

A validação, após a atualização dos dados gravimétricos, foi efetuada no programa DIVA, desenvolvido pelo *Bureau Gravimétrique International* (BGI). Os dados de entrada são as coordenadas, latitude e longitude, altitude ortométrica ou normal e as observações gravimétricas. Este software analisa os dados pelo método de colocação por mínimos quadrados. A previsão é sempre feita utilizando a anomalia residual. Um arquivo de saída apresenta a estatística da validação e a quantidade de pontos sujeitos a diferentes interpretações, denominados como pontos dúbios. O DIVA permite gerar figuras da elevação, da aceleração de gravidade, das anomalias, utilizando a triangulação de Delaunay (Guibas *et al.*, 1990).

A fim de completar o banco de dados gravimétricos de São Paulo utilizou-se o modelo do geopotencial EIGEN-6C4 (Förste *et al.*, 2014) com grau e ordem 2190 e o modelo digital de terreno *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (JPL, 2019). As informações gravimétricas e os dados de altitude foram avaliados com tolerância de 50  $\mu\text{Gal}$  e de 30 metros, respectivamente.

## 4.3 Modificações nas Anomalias de Ar-livre e de Bouguer

O comportamento das anomalias pontuais de ar-livre e de Bouguer no estado de São Paulo é apresentado nas Figuras 4 e 5, com a rede atualizada e complementada com os demais dados gravimétricos. Salienta-se que a unidade comumente utilizada para as anomalias é o miligal (mGal) correspondente a 1000 microgal ( $\mu\text{Gal}$ ).

As anomalias de ar-livre, como mencionado, são fortemente relacionadas com a topografia da região. Para o estado de São Paulo, os valores se concentram entre 0 a -20 mGal nas regiões que possuem variações topográficas de até 800 metros. Já em regiões de maiores irregularidades essa variação pode chegar a 120 mGal. O comportamento da anomalia de ar-livre em relação às altitudes é representado na Figura 6.

Os maiores valores das anomalias de ar-livre estão na região da serra Mantiqueira, na região nordeste do estado, onde também se tem as maiores altitudes.

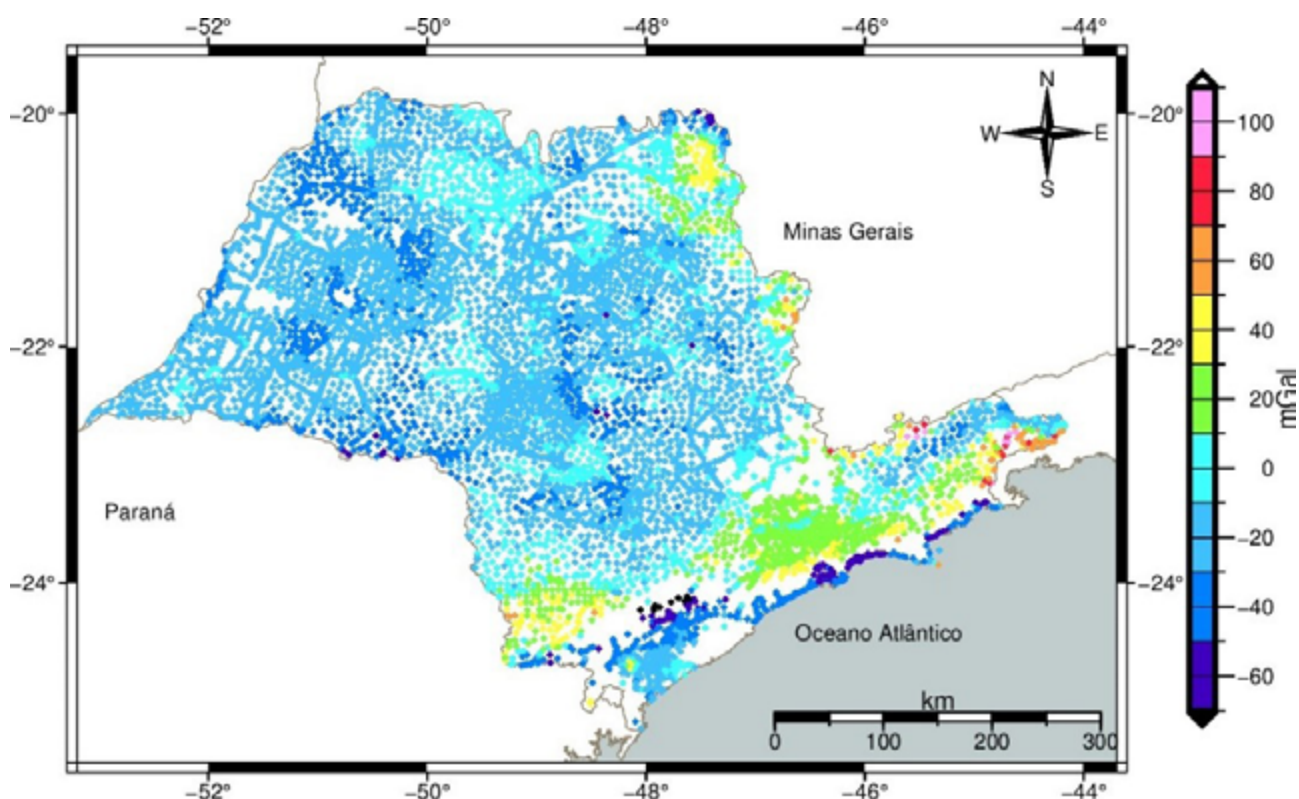


Figura 4 Anomalia de ar-livre no estado de São Paulo.



**Atualização da Estrutura Gravimétrica do Estado de São Paulo: Vínculo ao Sistema Gravimétrico de Referência**

Valéria Cristina Silva; Denizar Blitzkow; Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho; Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos & Iuri Moraes Bjorkstrom

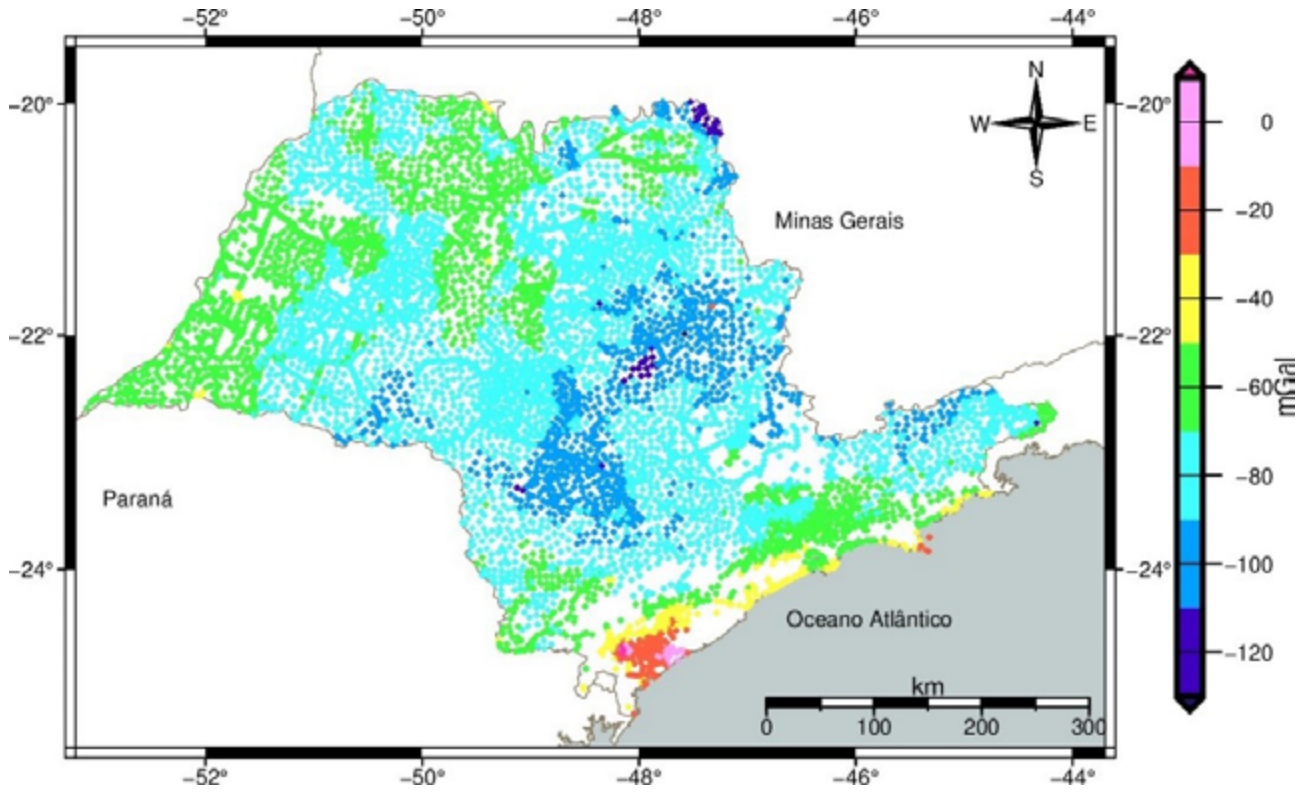


Figura 5 Anomalias de Bouguer no estado de São Paulo.

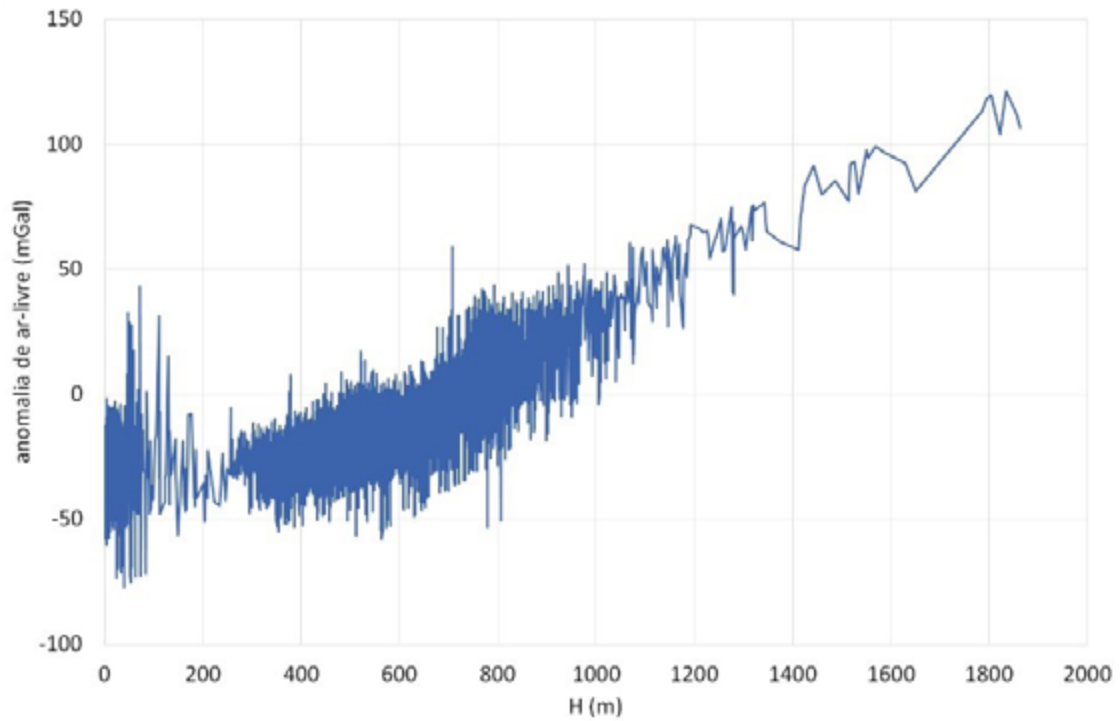


Figura 6 Anomalias de ar-livre e a altitude normal.

Diferentemente das anomalias ar-livre, a anomalia de Bouguer possui uma menor influência em relação à topografia (Figura 7). No estado de São Paulo os maiores valores estão localizados na região sudeste do estado (Figura 5), onde as altitudes variam de 0 a 500 metros.

A inclusão das referências gravimétricas absolutas evidenciou sobre as anomalias discrepâncias inferiores a 0,25 mGal. As diferenças encontradas são similares

para as anomalias de Bouguer e ar-livre e condizentes às modificações nos valores de  $g$  (Figura 8).

Embora as diferenças encontradas com a atualização sugiram pequenas modificações nas anomalias, para os referenciais altimétricos as modificações são significantes. Visto que o valor de  $g$  está sujeito a modificações de 0,3086 mGal por metro, seguindo uma aproximação da Terra normal, em unidades métricas a diferença de 0,25 mGal em  $g$  corresponde a 80 centímetros.

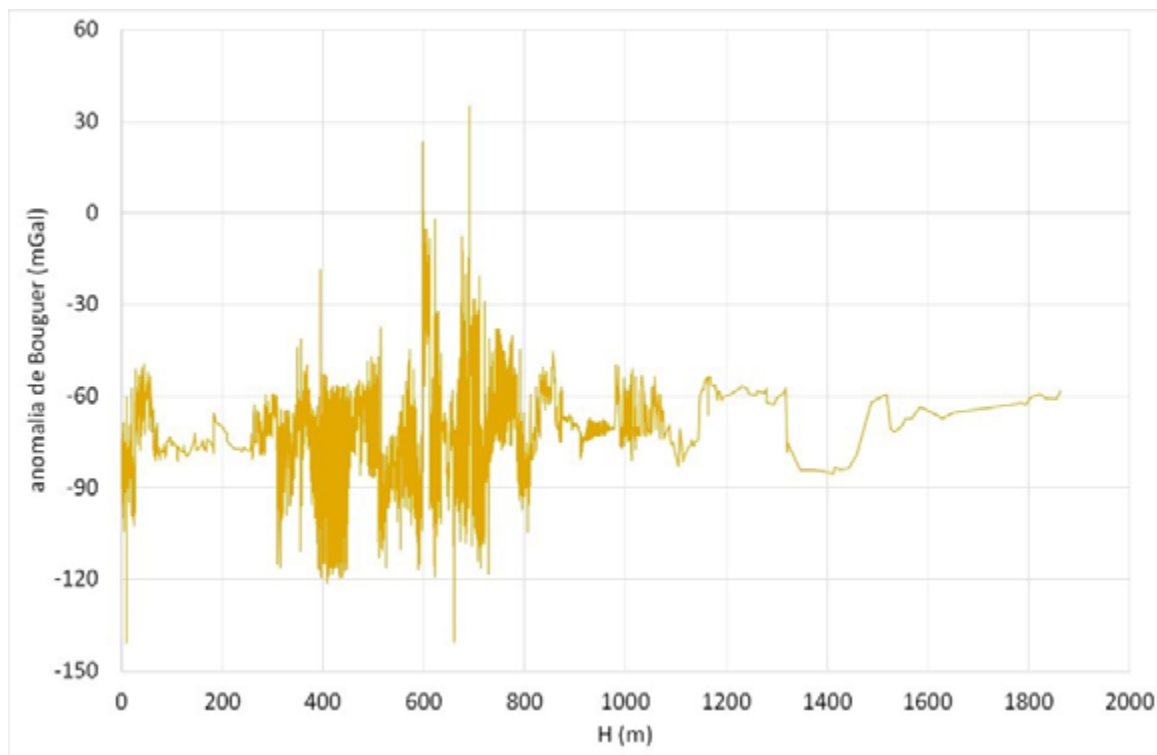


Figura 7 Anomalias de Bouguer e a altitude normal.

## 5 Conclusão e Considerações Finais

As atuais recomendações da IAG são direcionadas a refinar os referenciais altimétrico e gravimétrico a fim de prover as infraestruturas geodésicas capazes de monitorar e identificar as mudanças na Terra. Com a melhoria significativa da acurácia dos gravímetros absolutos, identificaram-se discrepâncias nos valores de  $g$  das estações IGSN-71 de diversos países, trazendo à tona a necessidade de substituição de tais referências. O presente trabalho objetivou avaliar as informações gravimétricas do estado de São Paulo, vinculadas à IGSN-71, a partir da conexão com as estações gravimétricas absolutas do SGR.

A substituição das referências vinculadas ao padrão IGSN-71 no estado de São Paulo demonstrou que apenas 12% das informações gravimétricas estavam com

discrepância superior a  $100 \mu Gal$ . Esses resultados indicam que o valor de  $g$  da única estação IGSN-71, referência para outras determinações no estado, está consistente com as observações dos gravímetros atuais.

As anomalias de ar-livre e de Bouguer, amplamente utilizadas como dado de entrada para estudos geodésicos e geofísicos, demonstram que a influência da atualização gravimétrica para 58% das informações do estado equivale em unidades métricas a 16 centímetros. Enquanto que áreas com modificações de  $250 \mu Gal$  a discrepância é de 80 cm.

Atualmente, o objetivo da Geodesia é a realização de um sistema de altitude global com precisão inferior a 2 cm. À vista disso, conclui-se que as modificações encontradas na atualização das informações gravimétricas, utilizando observações absolutas de gravidade são significativas para a realização dos referenciais altimétricos.

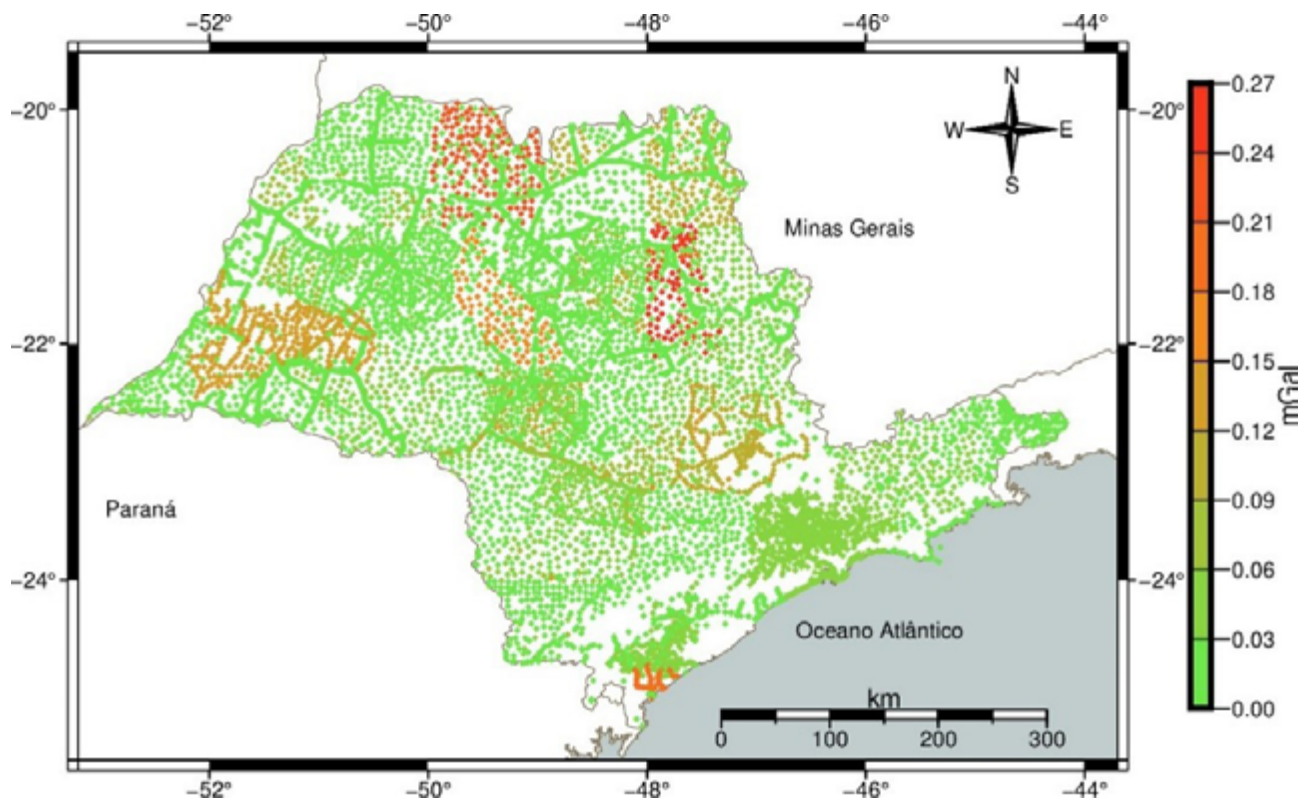


Figura 8 Diferenças encontradas nas anomalias de ar-livre após a atualização das informações gravimétricas.

A justificativa das discrepâncias apresentadas pelos valores absolutos de Cananéia e Valinhos exige uma análise rigorosa quanto à formação geológica, cargas hidrológica e oceânica, maré oceânica, e parâmetros e correções adotados na medição. A aceleração de gravidade é dependente de fenômenos naturais como, mudanças no nível do lençol freático, nas características geológicas, na carga oceânica e nos efeitos atmosféricos. Portanto, os mesmos podem influenciar em longo prazo as variações verificadas no valor de  $g$ . Nesse sentido, a apropriada comparação das observações absolutas por diferentes aparelhos requer medições contínuas e a aplicação de modelos para os fenômenos periódicos que interferem na variação de  $g$ .

Timmen *et al.* (2008) realizou um estudo ao longo de 21 anos na estação de Hannover (HAN103), com os gravímetros JILAG-3 e FG5 (número #101). Devido às características geológicas e hidrológicas do local, verificou-se um decréscimo linear na aceleração de gravidade de 25,2  $\mu\text{Gal}$ . Os referidos autores afirmam que apenas medições absolutas contínuas, adotando se possível gravímetros supercondutores, e discussões com especialistas em geodinâmica podem confirmar decréscimos ou acréscimos nas variações seculares da aceleração de gravidade.

## 6 Referências

- Amarante, R.R. 2012. *Sistematização do Processamento de Dados Gravimétricos Aplicados à Determinação do Modelo Geoidal*. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 183p.
- BGI. 2019. International Gravimetric Bureau. Gravity Databases. Disponível em: <<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases>>. Acesso em: 05 out. 2019.
- Castro Júnior, C.A.C. 2005. *Contribuição ao Estabelecimento de um Sistema Gravimétrico para a América do Sul*. Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Topografia e Geodesia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 158p.
- Castro Júnior, C.A.C.; Guimarães, G.N. & Ferreira, N.C. 2018. Evolução da Infraestrutura Gravimétrica no Brasil. *Revista do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista*, 37(2): 361-384.
- CENEGEO. 2019. Centro de Estudos de Geodesia. Disponível em: <<http://www.cenegeo.com.br/rede-grav-absoluta>>. Acesso em: 15 set. 2019.

- Förste, C.; Bruinsma, S.; Abrikosov, O.; Lemoine, J.-M.; Schaller, J.; Götz, H.J.; Ebbing, J.C.; Marty, J.C.; Flechtner, F.; Balmino, G. & Biancale, R. 2014. EIGEN-6C4 - The Latest Combined Global Gravity Field Model including GOCE Data up to Degree and Order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *In: EGU GENERAL ASSEMBLY, Viena, 2014*. Disponível em: < <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014EGUGA..16.3707F/abstract> >. Acesso em: 15 out. 2019.
- Gemael, C. 2012. *Introdução à Geodesia Física*. Paraná, Brasil, 302p.
- Guibas, L.J.; Knuth, D.E. & Sharir, M. 1990. Randomized Incremental Construction of Delaunay and Voronoi Diagrams. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 443: 414-431.
- Guimarães, G. & Blitzkow, D. 2011. Problema de Valor de Contorno da Geodésia: uma abordagem conceitual. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 17(4): 607-24.
- Guimarães, G.N. 2010. *A Altimetria e o Modelo Geoidal no Estado de São Paulo*. Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Topografia e Geodesia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 121p.
- Hofmann-Wellenhof & Moritz, H. 2006. *Physical Geodesy*. New York, United States, 403p.
- IAG. 2015. International Association of Geodesy. IAG Resolution (No. 1) for the Definition and Realization of an International Height Reference System (IHR5). *In: GENERAL ASSEMBLY OF THE INTERNATIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHYSICS (IUGG)*, Prague, Czech Republic, 2015. Disponível em: < [https://ihrs.dgfi.tum.de/fileadmin/JWG\\_2011/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](https://ihrs.dgfi.tum.de/fileadmin/JWG_2011/IAG_Resolutions_2015.pdf) >. Acesso em: 25 nov.2019.
- IAG. 2019. International Association of Geodesy. IAG Resolutions. *In: XXVIIth IUGG GENERAL ASSEMBLY, Montreal, Canada, 2019*. Disponível em: < <https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fd9c6aa0.pdf> >. Acesso em: 25 nov.2019.
- JPL. 2019. Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: < <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> >. Acesso em: 29 nov. 2019.
- Marti, U.; Richard, P.; Germak, A.; Vitushkin, L.; Pálinkás, V. & Wilmes, H. 2014. CCM – IAG Strategy for Metrology in Absolute Gravimetry Role of CCM and IAG. Disponível em: < [https://www.bipm.org/wg/CCM/CCM-WGG/Allowed/2015-meeting/CCM\\_IAG\\_Strategy.pdf](https://www.bipm.org/wg/CCM/CCM-WGG/Allowed/2015-meeting/CCM_IAG_Strategy.pdf) >. Acesso em: 03 jul. 2019.
- ON. 1986. Observatório Nacional. Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira 1976-1986. 16p.
- Piña, W.H.S. & Sousa, M.A. 2001. O Estado da Base de Dados Gravimétricos do Observatório Nacional (BDG-ON) Situação em Junho, 2001. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(3): 324-328.
- Sousa, M.A. & Santos, A. 2010. A. Absolute Gravimetry on the Agulhas Negras Calibration Line. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28: 165-174.
- Timmen, L.; Gitlein, O.; Müller, J.; Strykowski G. & Forsberg, R. 2008. Absolute Gravimetry with the Hannover Meters JILAg-3 and FG5-220, and their Deployment in a Danish-German Cooperation. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 133(3): 149-163.
- Torge, W. 2001. *Geodesy*. Berlin, 416p.
- Van Camp, M.; Viron, O.; Watlet, A.; Meurers, B.; Francis, O. & Caudron, C. 2017. Geophysics from Terrestrial Time-Varying Gravity Measurements. *Reviews of Geophysics*, 55: 938-992.
- Vermeer, M. 2018. *Physical Geodesy*. Aalto, Aalto University, 380p.
- Wilmes, H.; Wziontek, H. & Falk, R. 2015. Global Absolute Gravity Reference System as Replacement of IGSN 71. *Geophysical Research Abstracts*. Anais...2015, 17:14045-1. Disponível em: < <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-14045-1.pdf> >. Acesso em: 25 nov.2019.