



Rodrigo Rodrigues Nascimento

Determinação de uma estação gravimétrica de referência na garagem do instituto de Geociências - bloco P, Campus da Praia Vermelha, na Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ

Niterói, RJ - Brasil 4 de agosto de 2023 Rodrigo Rodrigues Nascimento

Determinação de uma estação gravimétrica de referência na garagem do instituto de Geociências - bloco P, Campus da Praia Vermelha, na Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ

Projeto Final de Graduação em Geofísica apresentado à Universidade Federal Fluminense como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica

Universidade Federal Fluminense - UFF

Orientador: Rodrigo Bijani

Niterói, RJ - Brasil 4 de agosto de 2023

Rodrigo Rodrigues Nascimento

Determinação de uma estação gravimétrica de referência na garagem do instituto de Geociências - bloco P, Campus da Praia Vermelha, na Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ

Projeto Final de Graduação em Geofísica apresentado à Universidade Federal Fluminense como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica

Avaliado pela seguinte comissão examinadora:

Rodrigo Bijani Orientador - Departamento de Geologia e Geofísica - Universidade Federal Fluminense (GGO/UFF)

Diego Takahashi Tomazella Coordenação em Geofísica - Observatório Nacional (ON/MCTIC)

Cosme Ferreira da Ponte Neto Coordenação em Geofísica - Observatório Nacional (ON/MCTIC)

> Niterói, RJ - Brasil 4 de agosto de 2023

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha mãe Hebe, por ter me criado sozinha com todo seu esforço em garantir o desenvolvimento da minha educação intelectual e pessoal nas quais formaram o homem que sou hoje.

Agradeço a minha Esposa Patricia que sempre esteve ao meu lado, sendo meu principal suporte nos momentos dificies, me incentivando, apoiando e sendo também minha melhor amiga e companheira nessa estrada da vida.

Ao meu orientador Rodrigo Bijani, agradeço fortemente pela oportunidade de trabalhar nesse projeto, além de ter me incentivado e ensinado academicamente e também me mostrando como ser um profissional e uma pessoa melhor.

Deixo meu agradecimento a equipe da Delfos Marítima, onde atualmente eu presto meus serviços, destacando um agradecimento especial para o Diretor Aluizio, ao Gerente de Hidrografia Italo, ao Administrador Adelmo Cardim e ao Mestre Alex. Todos sempre me apoiaram, me ensinam e são parte fundamental do desenvolvimento deste trabalho e da minha evolução como profissional.

Gostaria de agradecer ao Israeli , Alcides e ao Dr. Emanuelle do Observatório Nacional, por todo o apoio com o manuseio do gravímetro e com a parte de tratamentos de dados gravimétricos.

Quero agradecer também ao comandante Luiz Carlos Torres e o militar Felipe Chagas, que disponibilizaram os dados da estação gravimétrica da DHN, além de nos autorizar a acessar as dependencias da DHN para realizarmos a pesquisa do presente Trabalho.

Por fim, deixo um agradecimento geral para todos meus amigos e familiares que sabem que contribuiram e contribuem para o meu desenvolvimento pessoal.

Resumo

Com o avanço do tempo e da tecnologia, o campo da gravidade terrestre, suas influências e variações são conhecidas e investigadas em diferentes posições na Terra. A Geodésia contribui de forma latente para determinar a forma e as dimensões da Terra por meio do campo de gravidade da Terra, proporcionando cada dia mais informações sobre a Terra real. Um vasto acervo gravimétrico global adquirido ao longo do tempo enriquece a nossa compreenssão do campo terrestre, todavia o planeta compreende ambientes diversificados com estruturas e padrões completamente heterogêneos, o que em muitas situações dificulta, ou até mesmo impossibilita aquisições gravimétricas de alta acurácia. Tais leituras normalmente são realizadas através de gravímetros absolutos, todavia estes equipamentos necessitam de uma posição estacionária e um janela de leitura continua, o que nem sempre pode ser conseguido em uma expedição de campo. Adicionalmente, tais equipamentos exigem um alto custo financeiro para que possam o adquirir e manter, fazendo com que isto seja um entrave, refletindo no fato de se apresentarem em menor número quando comparados com os gravímetros relativos no território brasileiro. Como alternativa, expedições gravimétricas terrestres que usam os equipamentos relativos são muito importantes, já que são relativamente rápidas de serem executadas e ao mesmo tempo preservam o bom nível de precisão. Neste trabalho, descrevemos com detalhes a Transferência de Base Gravimétrica (TEG) para estabelecer uma estação absoluta de gravidade na garagem do bloco P do instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense, campus Niterói-RJ. O trabalho é iniciado através do levantamento planialtimétrico, usando o equipamento S800 da empresa STONEX, da estação a ser estabelecida, chamada de EGG01. Em seguida, visita-se a estação absoluta, localizada no farol da Divisão de Hidrografia e Navegação (DHN), no bairro Ponta D'areia, em Niterói (cerca de 2.3 km de distância da EGG01). Utilizando o gravímetro relativo CG-5 da empresa Scintrex, a gravidade relativa é medida em ambas as estações diversas vezes ao longo do dia, intercalando visitas. Com isso, é possivel calcular a variação da gravidade relativa entre as estações, que deve ser somada ao valor absoluto conhecido. Para validação do valor da gravidade absoluta obtida, calculamos as anomalias da gravidade, ar livre e Bouguer simples de ambas as estações. Além disso, usamos o modelo global de gravidade (MGG) EIGEN 6C4 para obter os valores absolutos de gravidade e as anomalias supracitadas para comparação. Portanto, o intuito deste trabalho é descrever e exemplicar a TEG material de consulta para futuras atividades.

Abstract

With the advancement of time and technology, the Earth's gravity field, its influences and variations are known and investigated in different positions on Earth. Geodesy contributes in a latent way to determine the shape and dimensions of the Earth through the Earth's gravity field, providing every day more information about the real Earth. A vast global gravimetric collection acquired over time enriches our understanding of the terrestrial field, however the planet comprises diverse environments with completely heterogeneous structures and patterns, which in many situations makes it difficult or even impossible to acquire high accuracy gravimetric measurements. Such readings are usually carried out using absolute gravimeters, however these equipment need a stationary position and a continuous reading window, which cannot always be achieved in a field expedition. AAdditionally, such equipment requires a high financial cost so that they can acquire and maintain it, making this an obstacle, reflecting the fact that they are presented in smaller numbers when compared to the relative gravimeters in the Brazilian territory. As an alternative, terrestrial gravimetric expeditions using relative equipment are very important, since they are relatively quick to be performed and at the same time preserve a good level of accuracy. In this work, we describe in detail the Transferência de Base Gravimétrica (TEG) to establish an absolute gravity station in the garage of Block P of the Institute of Geosciences of the Federal Fluminense University, campus Niterói-RJ. The work begins with a planial timetric survey, using the S800 equipment from the company STONEX, of the station to be established, called EGG01. Then, visit the absolute station, located in the lighthouse of the Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), in the Ponta D'areia neighborhood, in Niterói (about 2.3 km away from EGG01). Using Scintrex's CG-5 relative gravimeter, relative gravity is measured at both stations several times throughout the day, alternating visits. With this, it is possible to calculate the variation in relative gravity between seasons, which must be added to the known absolute value. For validation of the obtained absolute gravity value, we calculated the gravity, free-air and simple Bouguer anomalies of both stations. In addition, we used the EIGEN 6C4 Global Severity Model (MGG) to obtain the absolute severity values and the aforementioned anomalies for comparison. Therefore, the purpose of this work is to describe and exemplify the TEG reference material for future activities.

Sumário

	Sumário	6
	Lista de ilustrações	7
1	INTRODUÇÃO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	O campo de gravidade terrestre e a gravimetria	12
2.1.1	Gravimetria absoluta	12
2.1.2	Gravimetria relativa	13
2.1.3	Influências gravimétricas	14
2.2	Altimetria	17
3	METODOLOGIA	20
3.1	Aquisição Gravimétrica	20
3.1.1	Processamento gravimétrico	25
3.2	Aquisição e processamento altimétrico	27
3.3	Modelos globais de gravidade (MGGs)	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Altimetria	30
4.2	Gravidade absoluta	31
4.3	Anomalias gravimétricas	32
5	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS	35

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Cobertura nacional da rede gravimétrica fundamental brasileira. Fonte:(http	o://https://ww
	sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16286-rede-gravimetrica. https://doi.org/10.00000000000000000000000000000000000	ml?=t=downl
Figura 2 $-$	$Gravímetro \ absoluto \ Microg-LaCoste \ FG5 \ (http://www.microglacoste.com/micro$	/fg5.php). 13
Figura 3 –	(a) Fotografia do gravímetro relativo Scintrex CG-5 Autograv. (b) Ima-	
	gem da tela do equipamento ao final da aquisição, com as informações	
	fundamentais do processo.	14
Figura 4 –	Fotografia do equipamento S800 Stonex.	18
Figura 5 –	Modelo Ilustrativo de Cálculo de Altitude Ortométrica (https://mundogeo.c	com/wp-
	content/uploads/2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2015-para-rever-as-content/uploads/2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGEO2016/02/02/IBGEO2016/02/02/02/IBGEO2016/02/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2016/02/IB	
	altitudes-de-sete-pontos-culminantes.jpg)	19
Figura 6 –	Imagem do equipamento S800 da Stonex em utilização	19
Figura 7 $-$	(a) Localização da Estação EGG01. (b) Posição do gravimetro ao exe-	
	cutar as leituras sobre a estação EGG01	21
Figura 8 –	(a) Localização da EGA na DHN. (b) Posição do gravimetro ao executar	
	as leituras próximo ao Farol da DHN e (c) Placa com a informação da	
	gravidade absoluta medida no Farol.	22
Figura 9 –	Distância em linha reta entre as estações EGG01 (Alvo) e o farol da	
	DHN (Base).	23
Figura 10 –	Um esquemático simplicador da execução de uma visita para a TEG	
	descrita neste trabalho. Vale salientar que Base é a EGA da DHN e	
	Alvo é a EGA do EGGO1	24
Figura 11 –	Tabela com a gravimetria aquisitada em formato de visitas. Observe que	
	para cada visita são realizadas duas leituras, com informações adicionais	
	sobre desvio padrão de cada leitura, variações laterais (Tilt X e Tilt Y)	
	do equipamento em relação à superfície física local, além da hora de	
	Brasília do levantamento.	25
Figura 12 –	Tabela de Dados brutos com a média das leituras para cada "perna"	
	das visitas.	26
Figura 13 –	Tabela de Dados com a adição das diferenças entre leituras e a sua média	26
Figura 14 –	Tabela de Dados Apresentando o Valor Final de Gravidade para a	
	estação EGG01	27
Figura 15 –	Ilustração do modelo de conversão de altitudes elipsoidais em físicas	
	(https://www.ibge.gov.br/images/novoportal/dgc/hgeohnor/fig1.png).	27
Figura 16 –	Imagem da tela do aplicativo StatictoRinex para conversão do arquivo	
	de .dat para . <i>rinex</i>	28
Figura 17 –	Página de Processamento PPP do IBGE	29

Figura 18 –	Altimetria da estação EGG01 obtida no site do IBGE: modelo altimé-	
	trico de referência, fator de conversão de superfícies, altitude normal e	
	incerteza	30
Figura 19 –	Cálculo da Ondulação Geoidal da Estação Farol DHN	31
Figura 20 –	Gravidade Absoluta da Estação EGG01 Calculada Pelo Método de	
	Transferencia de Estação Gravimétrica de Primeira Ordem	31

1 Introdução

Os efeitos produzidos pela aceleração da gravidade no cotidiano humano são muito variados. Diversos estudos relacionados com o campo de gravidade da Terra tem sido realizados ao longo das últimas décadas com o intuito de promover uma melhor compreensão da interação entre a Terra e o ser humano. A partir de meados do século XX houve um avanço considerável nas técnicas voltadas à determinação da gravidade, melhorando gradativamente a precisão das medições e acarretando numa profusão de levantamentos gravimétricos espaciais, aerotransportados, marinhos e, principalmente, terrestres (CORREIA et al., 2018). A cada dia que passa surgem novos empregos para aceleração de gravidade, ampliando os horizontes de diversas ciências, com destaque às atividades ambientais (MENEZES et al., 2019), arqueológicas (CAMACHO et al., 2003), cartográficas (LOPES, 2007; JÚNIOR et al., 2022), de engenharia (FERNANDES; ROCHA; COUTINHO, 1991; VITUSHKIN, 2014), geodésicas (CATALÃO; SEVILLA, 2000; LI; GÖTZE, 2001), mineralógicas (FERREIRA, 2016) e petrolíferas (ARAÚJO, 2007).

Diversos fenômenos na Terra, tais como os abalos sísmicos, a precessão, a nutação e a velocidade de rotação do eixo, os movimentos das placas tectônicas e os processos vulcânicos requerem investigação contínua. Alguns desses acontecimentos implicam na redistribuição das massas crustais e/ou nas mudanças na forma e dimensões da Terra (WATTS, 2001). Além disso, o equilíbrio elástico gravitacional da crosta terrestre é afetado, resultando em pequenas variações na gravidade ao longo do tempo. Como sabemos, o valor da aceleração da gravidade q na superfície terrestre varia de forma inversamente proporcional ao quadrado da distância ao centro da Terra. Adicionalmente, um corpo situado na linha do equador sofre menos influência da gravidade do que nos polos (BLAKELY, 1996; KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). Com isso, pode-se afirmar que a latitude e altitude são influências significativas na variação de g. Entretanto, não se pode esquecer das diferenças nas densidades das massas existentes no interior e exterior da crosta terrestre, que também interferem na magnitude de g (SOUSA; SANTOS, 2010; CORREIA et al., 2018). Elas podem representam mudanças devido às causas naturais ou às atividades humanas. Por exemplo, aquelas oriundas da variação de armazenamento de água, minério, depósitos de petróleo e gás, umidade do solo, mudanças nas escavações feitas pelo homem, fluxo de massa dos vulcões ativos, entre outros (JUNIOR, 2005).

Para monitorar as variações na aceleração da gravidade e com isso estudar alguns dos fenômenos terrestres mencionados anteriormente, foi instaurada, a Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB - Figura 1). Em 1956, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) iniciou um programa para estabelecer o sistema geodésico de referência horizontal para o Brasil. Durante o projeto, foram determinadas mais de 2000 estações gravimétricas em torno do VT Chuá, ponto origem, situado em Minas Gerais. Com o término dos trabalhos, o IBGE executou diversos outros levantamentos gravimétricos em conjunto com universidades e institutos de pesquisa.



Figura 1 – Cobertura nacional da rede gravimétrica fundamental brasileira. Fonte:(http://https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoessobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16286-redegravimetrica.html?=t=downloads).

Uma rede absoluta, basicamente, 1) coloca em escalas as redes pré-existentes, 2) serve como referência única para todas as novas redes relativas, 3) atende à calibração de gravímetros relativos e 4) auxilia nos estudos e pesquisas que exijam alta precisão, como a geodinâmica de marés terrestres e a variação secular da gravidade (JUNIOR, 2005). Contudo, a gravimetria somente adquiriu um caráter sistemático a partir de 1990, quando o IBGE estabeleceu estações gravimétricas visando recobrir os grandes vazios de informação sobre g que existem, especialmente nas regiões norte, centro-oeste e nordeste do Brasil. Desde então, mais de 26000 estações foram estabelecidas nestas regiões (CORREIA et al., 2018).

Dentre as diversas concepções sobre as redes gravimétricas terrestres, é consensual

que as redes absolutas e relativas são as mais significativas. A gravimetria absoluta consiste em determinar o valor de g diretamente do equipamento utilizado. Este pode utilizar-se de dispositivos pendulares, já em desuso, ou ainda através da queda livre de uma massa de prova. Conforme Gemael (1999), a partir da medição acurada de intervalos infinitesimais nos tempos e nas distâncias em queda livre, a modalidade de determinação absoluta baseada em queda livre ganhou notoriedade (CORREIA et al., 2018; GUIMARÃES et al., 2020). A gravimetria absoluta é financeiramente custosa e preferível em estações com bases estáveis e abrigadas do sol, chuvas e ventos, já que os vários componentes mecânicos e eletrônicos são bastante sensíveis. Dessa forma, o manuseio e deslocamentos com o equipamento requerem cuidados redobrados.

A gravimetria relativa surge como facilitadora das limitações de deslocamento e custo dos equipamentos absolutos. Neste caso, o funcionamento da maior parte desses instrumentos considera que o peso de uma massa de prova, sustentada por um sistema elástico, seja contraposto à força de gravidade. Assim que o sistema entra em equilíbrio, as observações podem ser realizadas. Desta forma, medições empreendidas entre dois ou mais pontos de observação permitem que as correspondentes diferenças de gravidade sejam deduzidas. Em seu trabalho, Correia et al. (2018) apresenta uma vasta gama de informações acerca das atividades gravimétricas até então empreendidas em território brasileiro, retratando as principais técnicas e instrumentos utilizados.

Neste trabalho estabelecemos uma estação gravimétrica absoluta a partir da gravimetria relativa, identificada por EGG01 localizada na garagem do bloco P, no instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense, campus da praia vermelha, em Niterói - RJ. Para isso, utilizamos o método do transporte de estação gravimétrica (TEG) de primeira ordem entre a estação absoluta localizada no farol da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, no bairro da Ponta D'areia, em Niterói, RJ. A fundamentação teórica básica e os detalhes do TEG são discutidos e apresentados em um dos capítulos deste documento. O gravímetro relativo CG-5, da empresa canadense Scintrex foi utilizado durante leituras gravimétricas relativas. Como validação do valor da gravidade absoluta obtido na estação EGG01 pelo TEG, as coordenadas planialtimétricas da estação EGG01 foram medidas pelo equipamento S800, da empresa italiana STONEX, que foi gentilmente cedido pela empresa Delfos Marítima. Dessa forma, reduções gravimétricas fundamentais, tais como as reduções de latitude, ar livre e Bouguer podem ser aplicadas à gravidade absoluta da estação EGG01. Uma breve análise sobre conceitos fundamentais da altimetria são introduzidos neste trabalho para exemplificar o que foi feito na etapa de metodologia. Por conseguinte, visitamos o International Centre for Global Earth Models (ICGEM) do Helmholtz Centre, da universidade de Potsdam, na Alemanha para calcular, através do modelo global EIGEN 6C4 (INCE et al., 2019), os valores de gravidade absoluta de ambas as estações consideradas neste trabalho. Dessa forma, podemos analisar com maior confiabilidade o resultado obtido em nosso TEG.

2 Fundamentação Teórica

2.1 O campo de gravidade terrestre e a gravimetria

A descoberta da força gravitacional por Galileu Galilei, em 1590, e sua quantificação por Isaac Newton, em 1687 podem ser considerados os principais eventos históricos associados à gravitação. Baseado no campo de gravidade da Terra (i.e., a soma vetorial entre as acelerações gravitacional e centrífuga), o método gravimétrico afere as variações no campo de gravidade da Terra (BLAKELY, 1996). Mesmo que em pequenas magnitudes, tais variações permitem inferências sobre a densidade e a forma dos alvos em subsuperfície. Essas variações podem ser devido às heterogeneidades das rochas e formações adjacentes. A prospecção gravimétrica possui uma ampla aplicabilidade, incluindo desde mapeamento de fontes em superfície até a determinação da espessura crustal (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). Para uma visão econômica, auxilia na identificação e avaliação do potencial de jazidas diversas, como: carvão, petróleo, sal, bem como matéria-prima para a indústria de cerâmica e construção civil (TELFORD et al., 1990; REYNOLDS, 2011).

Outra aplicação fundamental do método gravimétrico está na determinação acurada da forma e das dimensões do planeta Terra por meio das variações do campo de gravidade terrestre (TORGE, 1983; CARGNELUTTI et al., 2007). Para atingir o seu objetivo de determinar a forma e as dimensões da Terra, a Geodésia física estuda os parâmetros definidores do campo da gravidade terrestre que fornecem os fundamentos necessários para a definição da forma e das dimensões do planeta. A partir desses fundamentos são também estabelecidos os sistemas geodésicos de referência, que são a base da representação dos dados espaciais que se distribuem na superfície da Terra (ESCOBAR, 2000).

2.1.1 Gravimetria absoluta

O princípio de funcionamento dos gravímetros absolutos (ver Figura 2 consiste na medição do tempo de queda (ou ascenção) de uma massa de prova em uma câmara a vácuo. Para se determinar o gradiente vertical da gravidade no local com elevada precisão, é também medido o tempo de passagem da massa a cada 10 cm.



A observação da massa em queda livre é feita utilizando interferometria para a medida das distâncias e relógios atômicos ou de quartzo para a medida do tempo. Os gravímetros absolutos são usados na medição do valor da gravidade em marcos de referencia e da sua variação no tempo. Normalmente, estas marcas são usadas como referência para o desenvolvimento de redes gravimétricas observadas com gravímetros relativos (ANGELIS et al., 2011).

2.1.2 Gravimetria relativa

Os gravímetros relativos baseiam-se na medição da variação vertical da posição de uma massa de prova, através da relação de equilíbrio entre a força da gravidade e uma outra força, que pode ser mecânica, para o caso dos gravímetros analógicos, ou de origem electromagnética, no caso dos gravímetros digitais (JUNIOR, 2005).

Os gravímetros digitais foram desenvolvidos para atender com relativa precisão atividades na área de gravimetria. No caso do gravímetro Scintrex, a sua faixa de atuação abrange todas as regiões do globo (i.e., na faixa dos 7000 mGal) e possui uma resolução de leitura de 0.005*mGal* no modelo CG-3 e de 0.001 mGal no modelo CG-3M e uma deriva de 0.02 mGal/dia, tendo uma repetibilidade melhor que 10 mGal (TIMMEN; GITLEIN, 2004). O sensor deste instrumento é baseado num sistema elástico de quartzo fundido (HUGILL; VALLIANT, 1986). Há outras características que devem ser destacadas nos gravímetros digitais, tendo em vista sua facilidade operacional. As leituras são feitas automaticamente após o equipamento estar nivelado sobre um ponto. O tempo de aquisição da gravidade é definido pelo operador, sendo a leitura final o valor médio das amostras, acompanhado da respectiva incerteza padrão. No final deste processo, a leitura é armazenada na memória do equipamento juntamente com outras variáveis, tais como: número da estação, incerteza padrão da média, duração da leitura, correção devido à maré terrestre, número de amostras rejeitadas e as inclinações nos eixos x e y do plano principal (horizontal) do gravímetro. A Figura 3 (a) apresenta o gravímetro CG-5 da Scintrex devidamente nivelado, enquanto que a Figura 3 (b) mostra a tela do equipamento ao final de uma aquisição gravimétrica. Uma outra vantagem do gravímetro Scintrex é não possuir uma tabela de conversão das unidades, cujas leituras já estão em miliGals.



Figura 3 – (a) Fotografia do gravímetro relativo Scintrex CG-5 Autograv. (b) Imagem da tela do equipamento ao final da aquisição, com as informações fundamentais do processo.

Neste trabalho, por não termos acesso a um gravímetro absoluto, utilizamos a gravimetria relativa, cuja vantagem é justamente o gasto de tempo para adquirir um valor da gravidade em uma estação gravimétrica, além do transporte, já que trata-se de um equipamento menor e portanto bem mais leve.

2.1.3 Influências gravimétricas

A magnitude do campo da gravidade em um ponto depende basicamente de cinco fatores, além da rotação da Terra: maré terrestre, latitude, elevação, topografia do terreno ao redor e variações de densidade das rochas de subsuperfície. O método está interessado em determinar a variação lateral de densidade sem a intervenção de outros fatores. Felizmente é possível remover a maioria dos efeitos que não estão relacionados à variação de densidade com alta precisão através de reduções gravimétricas (BLAKELY, 1996; TELFORD et al., 1990; CARGNELUTTI et al., 2007).

A aquisição requer diversos cuidados em relação à estação gravimétrica, especialmente uma acurada altimetria, uma vez que a gravidade depende fortemente da altitude (JUNIOR, 2005; CARGNELUTTI et al., 2007). Após a aquisição dos dados, é necessário realizar as reduções gravimétricas, uma vez que a gravidade observada sofre a influências diversas, tais como o efeito da maré sólida, da rotação da Terra, da deriva instrumental e outros fatores associados (WILLIAM, 2007). Tais reduções podem ser divididas temporais e espaciais. As primeiras podem ser sumarizadas como:

1. Reduções de deriva instrumental:

No caso da deriva estática, ocorre quando o circuito sofre interrupções com duração superior a uma hora. Neste caso o gravímetro fica parado sobre um ponto por mais de uma hora, sendo necessário realizar duas leituras sobre o ponto, uma na "chegada" e outra na "saída". Neste caso, o equipamento é posto para operar em modo estático por um período superior a 12 horas, medindo valores de gravidade em intervalos de tempo regulares. Dessa forma, um conjunto de dados é gerado e então um novo fator de deriva é determinado. O cálculo é realizado com base na diferença entre as leituras final e inicial do ciclo de tempo no qual o gravímetro esteve em operação, dividida pelo tempo total do ciclo (e.g. 12/24 horas). Assim, tem-se o novo fator de correção para a deriva instrumental dado em mGal/dia. Como o instrumento apresenta uma deriva diária consideravelmente alta em relação aos gravímetros analógicos, é recomendado a realização deste procedimento a cada dois meses (CORREIA et al., 2018). Neste trabalho, a deriva instrumental foi realizada dias antes da expedição de campo, de forma automática pelo equipamento CG-5.

No caso da deriva dinâmica, há mudanças no comportamento do sistema elástico do gravímetro, tais como a variação da temperatura e eventuais trepidações durante o transporte do equipamento. Esses fatores fazem com que as leituras executadas na mesma estação, em horas diferentes podem eventualmente não coincidir. Neste caso, não utilizamos esta redução pois o equipamento foi utilizado por algumas poucas horas do dia. Para tempo maior, é recomendado que a redução seja operada.

2. Redução de maré:

Efeito da maré sólida que influencia o valor do campo da gravidade devido à atração entre Terra e Lua. Trata-se de uma redução realizada durante a própria aquisição gravimétrica, devido à tecnologia apresentada na maioria dos gravímetros utilizados atualmente, inclusive no CG-5 Autograv apresentada na Figura 3(a);

Já as reduções espaciais são:

1. Redução de Latitude:

Realizada para calcular a anomalia da gravidade, onde comumente usa-se a Fórmula Internacional da Gravidade proposta por Li e Götze (2001). Basicamente, considera-se a Terra como um elipsóide de revolução e calcula-se o valor da gravidade normal em uma determinada latitude. Por fim, subtrai-se a gravidade absoluta da normal para a mesma latitude para que a anomalia da gravidade seja calculada corretamente.

2. Redução Ar-livre (*Free-air*, em inglês)

Efeito da altitude do ponto de observação, importante para calcular a anomalia de ar-livre, uma vez que o valor da gravidade diminui com a altitude (ESCOBAR, 2000). A redução de ar-livre (R_{AL}) pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$R_{AL} = -0,3086H, (2.1)$$

em que H é a altitude ortométrica (i.e., a diferença de altitude entre superfície física e Geóide), dada em metros. A Equação 2.1 indica que a gravidade diminui com a altitude na proporção de 0, 3086 mGal para cada metro de elevação.

3. Redução Bouguer:

Embora criteriosa, elimina o efeito da ausência (ou excesso) de massa retirado (ou preenchido) em um nível de observação sobre a superfície física da Terra. O objetivo da redução de Bouguer é a remoção completa das massas topográficas sobre o geóide e o cálculo desse efeito sobre o valor da gravidade observado. A redução Bouguer (R_{BG}) pode ser calculada a partir da seguinte relação:

$$R_{BG} = 0.0419\rho H, \tag{2.2}$$

em que ρ é a densidade (em g/cm^3) estabelecida para as massas topográficas sobre o Geóide, e H é a mesma altitude ortométrica, dada em metros. A Equação 2.2 deve ser subtraída da anomalia de ar livre, para que a anomalia Bouguer simples seja adequadamente obtida;

4. Redução de terreno:

A redução Bouguer simples não remove completamente o efeito das massas do terreno circundante à estação gravimétrica. Portanto, faz-se necessário realizar a compensação das massas topográficas associadas às proximidades das observações, tais como a presença de montanhas ou vales. Para maiores detalhes do processo matemático, o leitor é convidado a Catalão e Sevilla (2000) e Escobar (2000). Em nosso caso, as estações EGG01 e Farol da DHN estão ao nível do mar, fato que inutiliza a redução de Terreno, que contribui sensívelmente para a gravidade a partir dos 100 metros de elevação (SOUSA; SANTOS, 2010; SILVA et al., 2018).

Cada uma das etapas de redução listadas acima são necessárias para que a gravidade instrumental bruto seja transformado em anomalias específicas, como a Bouguer, fundamental para a interpretação Geológica/Geofísica voltada à exploração. Para maiores informações conceituais sobre cada etapa, o leitor é convidado a (TELFORD et al., 1990; BLAKELY, 1996; ESCOBAR, 2000).

2.2 Altimetria

Como mencionado anteriormente, a gravidade está diretamente relacionada com a altitude. Dessa forma, para calcular as reduções gravimétricas dadas pelas Equações 2.1 e 2.2, precisamos das altitudes físicas com precisão. Por isso, vale a pena apresentar uma pequena fundamentação sobre altimetria. Como sabemos, o homem sempre teve o interesse de reconhecer o seu lugar no espaço, e ao longo dos tempos diversos métodos foram explorados para atingir tal objetivo com maior precisão. (MONICO, 2002). O Global positioning System (GPS) permitiu que uma pessoa em qualquer lugar da superfície terrestre pudesse ter a sua disposição, no minímo, quatro satélites o rastreando, desta forma a posição do usuário pode ser obtida em tempo real (MONICO, 2002). Logo, este sistema teve um grande crescimento e começou a ser utilizado frequentemente em trabalhos de levantamentos geodésicos, topográficos e em auxílio a navegação. Para determinarmos a posição (i.e., latitude e longitude) e altimetria (i.e., altitute física) da estação EGG01 foi utilizado o receptor S800, da empresa italiana Stonex (ver Figura 4). Este equipamento mede a altitude elipsoidal a partir dos diversos modelos georeferenciais disponiveis, tendo como opção o SIRGAS2000, que nada mais é do que um sistema geocêntrico de referência unificado para todo o território sul-americano e o sistema utilizado para o pós-processamento de dados através do serviço online disponível pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).



Figura 4 – Fotografia do equipamento S800 Stonex.

O intuito de realizar a altimetria serve como etapa preliminar na obtenção da altitude ortométrica (i.e., referida ao Geóide¹) em um determinado ponto, todavia aparelhos topográficos não conseguem obter mensurações a partir de uma superfície curva. Dessa forma, os altímetros registram a distância vertical entre um ponto na superfície física e um sobre uma superfície fictícia de referência (GUIMARÃES, 2010).

Para calcular a altitude ortométrica é necessário conhecer a diferença entre as altitudes elisoidal pela ondulação geoidal. Esta última grandeza representa a diferença entre a superficíe geoidal e elipsoidal. A altitude elipsoidal h é a dada pelo altímetro, H é a desejada altitude ortométrica e N é a ondulação geoidal, fundamental para que haja correlação entre as altitudes física e fictícea, que é devida seguinte relação:

$$H = h - N. \tag{2.3}$$

A Figura 5 ilustra os conceitos altimétricos mencionados até aqui, juntamente com a Equação 2.3.

¹ Superfície equipotencial do potencial da gravidade associado ao nível médio dos mares não perturbados (ESCOBAR, 2000).



Figura 5 – Modelo Illustrativo de Cálculo de Altitude Ortométrica (https://mundogeo.com/wp-content/uploads/2016/02/IBGE-aplica-o-MAPGEO2015-para-rever-as-altitudes-de-sete-pontos-culminantes.jpg)

Na aquisição dos dados de posicionamento, o equipamento Stonex S800 (Figura 6) foi configurado para o modo estático, onde nesta função o equipamento permanece parado em um mesmo ponto e realiza coleta de dados simultaneas em um certo período de tempo. Em nosso trabalho, o modo estático foi acionado por 55 minutos em intervalos de 1 segundo.



Figura 6 – Imagem do equipamento S800 da Stonex em utilização.

3 Metodologia

Neste trabalho, seguimos o TEG exemplificado no trabalho de Fonseca, Terra e Santos (2017) para estabelecer um nova estação gravimétrica absoluta (EGA) usando gravimetria relativa. Basicamente, as etapas a serem seguidas para realização do trabalho podem ser listadas como a seguir:

- Definição de uma nova EGA em local víavel, ou seja, livre de ação antrópica contínua, em que haja sinal de satélite para realizar a altimetria satelital via GNSS (*Global Navigation Satellite System*, em inglês) e que dificilmente seja alterada ao longo do tempo;
- Localizar uma EGA já estabelecida, que seja relativamente próxima da nova estação (i.e., raio aproximado de 50 km), para que o TEG seja realizado em um único dia de trabalho, sendo então considerado uma transferência gravimétrica de primeira ordem;
- 3. Realizar derivas instrumentais no gravímetro CG-5 antes da atividade;
- Medir inicialmente com o CG-5 na EGA onde o valor da gravidade absoluta já foi previamente estabelecido, para determinar a relação entre a gravimetria absoluta e a relativa;
- 5. Em seguida, visitar a nova estação e medir a gravidade relativa com o CG-5;
- 6. Repetir o ciclo de medidas em processo de "bate-e-volta" entre as duas estações n vezes, para aumentar a precisão do valor da gravidade absoluta na nova EGA;
- 7. Finalizar o procedimento realizando a última leitura gravimétrica na EGA conhecida;
- Cálculo da diferença da gravidade relativa entre as duas estações para cada ciclo de medidas;
- 9. Determinação de gravidade absoluta e o desvio padrão da nova EGA.

A seguir, vamos listar com mais detalhes cada etapa ligeiramente descrita acima.

3.1 Aquisição Gravimétrica

Para a escolha da nova EGA, alguns parâmetros precisam ser levados em consideração para que a aquisição dos dados seja realizada de forma única e precisa.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

No presente trabalho, a nova EGA é a estação EGG01 (ver Figura 7), que foi escolhida de modo a ser um local onde as leituras gravimétricas relativas podessem ser realizadas sem muitas interferências indesejaveis. O local também faz parte das depências do instituto de Geociências, o que facilita o acesso para a aquisição de dados e para futuras visitas de membros do departamento.



Figura 7 – (a) Localização da Estação EGG01. (b) Posição do gravimetro ao executar as leituras sobre a estação EGG01.

Além da influência do local escolhido na aquisição gravimétrica, também é preciso levar em consideração à captação dos sinais satelitais para realização da altimetria. Apesar do ponto escolhido para a estação EGG01 ser no portão de garagem do prédio do instituto de Geociências, em teste prévio de posicionamento planialtimetrico, os dados apresentaram uma boa precisão e bons resultados. Durante o TEG, é preciso conhecer uma EGA, preferencialmente próxima à nova estação gravimétrica, para mensurar a gravidade absoluta por meio de medidas relativas. A estação de referência utilizada neste trabalho fica localizada na Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), onde temos gravidade absoluta e posição planialtimétrica conhecidos. A Figura 8 (a) representa a localização Georeferenciada do Farol da DHN, no bairro da Ponta da Areia em Niterói. A Figura 8 (b) apresenta uma fotografia do local e na Figura 8 (c) tem-se a imagem da placa fixada no Farol com a informação da gravidade absoluta local.



(c)

Figura 8 – (a) Localização da EGA na DHN. (b) Posição do gravimetro ao executar as leituras próximo ao Farol da DHN e (c) Placa com a informação da gravidade absoluta medida no Farol.

Definida as duas estações, basta averiguarmos a possibilidade de se deslocar-se facilmente entre os dois pontos, para que a aquisição de dados seja realizada de forma continua dentro de um mesmo dia de trabalho. A Figura 9 demonstra as duas estações e a sua distancia direta. Previamente ao início da coleta de dados gravimétricos, deve-se certificar-se que o gravímetro relativo esteja corretamente calibrado. Recomenda-se que seja realizada uma visita na linha de calibração ON-Agulhas Negras, conforme mencionado



Figura 9 – Distância em linha reta entre as estações EGG01 (Alvo) e o farol da DHN (Base).

no trabalho de Sousa e Santos (2010). Para a aquisição gravimétrica, um planejamento de visitas entre as duas estações deve ser definido. Autores como Fonseca, Terra e Santos (2017) recomendam que a gravidade relativa seja medida primeiramente na EGA da DHN e posteriormente na nova estação (i.e., EGA do EGG01). Dessa forma, adquire-se um par de leituras gravimétricas relativas, que podemos chamar neste contexto de uma visita. Recomenda-se a realização de um número significativo (n > 4) de visitas, finalizando o processo na EGA da DHN. Preferencialmente, todos os dados devem ser coletados em uma mesmo dia para que possamos ter um acompanhamento da deriva instrumental de forma continua. A Figura 10 mostra uma modelo esquemático de execução de das visitas.



Figura 10 – Um esquemático simplicador da execução de uma visita para a TEG descrita neste trabalho. Vale salientar que Base é a EGA da DHN e Alvo é a EGA do EGGO1.

Na TEG entre a DHN e o EGG01 foram realizadas n = 5 visitas, sendo que em cada visita as leituras de gravidade relativa foram realizada duas vezes, no intuito de coletarmos o dado em redundância para reduzir o risco de erros. Na Figura 11 podemos conferir os dados gravimétricos coletados durante a fase de aquisição.

Visita	Local	Grav. Medida (mgal)	S.D	Tilt X.	Tilt Y.	Time (Brasília)
1	DUN	5456.418	0.040	0.7	0.5	9:28
1		5456.419	0.059	-3.8	0.2	9:35
2	ECC01	5456.611	0.057	0.2	-5.7	10:07
2	20001	5456.612	0.051	-3.1	-1.5	10:13
3	DUN	5456.397	0.045	2.1	-1.3	10:44
3		5456.404	0.063	1.3	-1.7	10:50
4	FCC01	5456.594	0.049	-0.8	-3.1	11:20
4	20001	5456.600	0.051	-3.2	-1.7	11:27
5	DUN	5456.400	0.043	-2.3	0.2	12:02
5		5456.403	0.058	-3.8	-2.1	12:07
6	FCC01	5456.604	0.044	1.7	-5.0	12:32
6	20001	5456.605	0.044	-1.2	-3.2	12:37
7	DUN	5456.393	0.052	-1.0	-7.1	13:07
7		5456.395	0.067	-2.3	-2.1	13:12
8	ECC01	5456.599	0.053	3.7	-5.1	13:37
8	20001	5456.601	0.055	-0.5	0.0	13:43
9		5456.384	0.062	-7.4	-2.1	14:12
9	DHN	5456.397	0.060	-0.2	-4.4	14:16
10	ECC01	5456.589	0.049	1.3	-0.4	14:40
10	20001	5456.598	0.069	1.8	-3.4	14:45
11	DHN	5456.386	0.052	-1.8	-2.3	15:07
11	Univ	5456.396	0.061	-0.1	-2.0	15:12

Figura 11 – Tabela com a gravimetria aquisitada em formato de visitas. Observe que para cada visita são realizadas duas leituras, com informações adicionais sobre desvio padrão de cada leitura, variações laterais (Tilt X e Tilt Y) do equipamento em relação à superfície física local, além da hora de Brasília do levantamento.

3.1.1 Processamento gravimétrico

Após a etapa de aquisição dos dados, seguimos o processamento, onde são executados os cálculos para definir a gravidade absoluta da estação EGG01 a partir do TEG de primeira ordem. Inicialmente, calculamos a média dos dois valores coletados para cada "perna" da visita, conforme mostra a Figura 11. A Figura 12 demonstra os valores médios de gravidade relativo obtidos para as n = 5 visitas, totalizando 10 leituras mais 1 para fechar o processo.

Aplicando o conceito de gravidade relativa, devemos então calcular a diferença relativa entre as estações DHN e EGG01, por meio das médias entre as leituras em cada "perna" das visitas, conforme destacado a seguir:

$$\Delta G_i = l_i - l_{base},\tag{3.1}$$

em que l_i representa a média das leituras de cada visita à estação EGG01 e l_{base} é a média das leituras da estação farol da DHN. Para exemplificar o uso da Equação 3.1, temos que primeiramente calcular a média das leituras da EGA farol da DNH e subtraí-la das leituras realizadas na EGG01. A Equação 3.1 representa a diferença média da gravidade relativa entre a estação base e alvo. A Figura 13 mostra, em tabela, o resultado da operação descrita acima.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

Visita	Local	Grav. Medida (mgal)	S.D	Tilt X.	Tilt Y.	Time (Brasília)	Grav. Média (mgal)	
1	DUN	5456.418	0.040	0.7	0.5	9:28		
1		5456.419	0.059	-3.8	0.2	9:35	5450.4165	
2	ECC01	5456.611	0.057	0.2	-5.7	10:07	5456 6115	
2	20001	5456.612	0.051	-3.1	-1.5	10:13	5450.0115	
3		5456.397	0.045	2.1	-1.3	10:44	5456 4005	
3		5456.404	0.063	1.3	-1.7	10:50	5450.4005	
4	ECC01	5456.594	0.049	-0.8	-3.1	11:20	5456 5070	
4	60001	5456.600	0.051	-3.2	-1.7	11:27	5456.5970	
5	DUN	5456.400	0.043	-2.3	0.2	12:02	- 5456.4015	
5		5456.403	0.058	-3.8	-2.1	12:07		
6	ECC01	5456.604	0.044	1.7	-5.0	12:32	- 5456.6045	
6	20001	5456.605	0.044	-1.2	-3.2	12:37		
7	DUN	5456.393	0.052	-1.0	-7.1	13:07	5456 2040	
7		5456.395	0.067	-2.3	-2.1	13:12	5450.5940	
8	ECC01	5456.599	0.053	3.7	-5.1	13:37	5456 6000	
8	20001	5456.601	0.055	-0.5	0.0	13:43	5450.0000	
9	DUN	5456.384	0.062	-7.4	-2.1	14:12	E4E6 200E	
9	DHN	5456.397	0.060	-0.2	-4.4	14:16	5450.3505	
10	EGG01	5456.589	0.049	1.3	-0.4	14:40	5456 5025	
10	20001	5456.598	0.069	1.8	-3.4	14:45	5450.5935	
11	DHN	5456.386	0.052	-1.8	-2.3	15:07	5456 2010	
11		5456.396	0.061	-0.1	-2.0	15:12	5450.5910	

Figura 12 – Tabela de Dados brutos com a média das leituras para cada "perna" das visitas.

Visita	Local	Grav. Medida (mgal)	S.D	Tilt X.	Tilt Y.	Time (Brasília)	Grav. Média (mgal)	∆G (li - l1)
1	DUN	5456.418	0.040	0.7	0.5	9:28	E4E6 2002	
1		5456.419	0.059	-3.8	0.2	9:35	5450.5995	
2	FCC01	5456.611	0.057	0.2	-5.7	10:07	EAEC C11E	0 2122
2	20001	5456.612	0.051	-3.1	-1.5	10:13	5450.0115	0.2122
4	ECC01	5456.594	0.049	-0.8	-3.1	11:20	E4E6 E070	0 1077
4	20001	5456.600	0.051	-3.2	-1.7	11:27	5456.5970	0.1977
6	ECC01	5456.604	0.044	1.7	-5.0	12:32	E456 6045	0.2052
6	20001	5456.605	0.044	-1.2	-3.2	12:37	5450.0045	0.2052
8	ECC01	5456.599	0.053	3.7	-5.1	13:37	E456 6000	0.2007
8	20001	5456.601	0.055	-0.5	0.0	13:43	5450.0000	0.2007
10	ECC01	5456.589	0.049	1.3	-0.4	14:40	E456 5025	0 1042
10	60001	5456.598	0.069	1.8	-3.4	14:45	5450.5955	0.1942

Figura 13 – Tabela de Dados com a adição das diferenças entre leituras e a sua média

Encontrado
o ΔG_i relativo a cada visita na estação alvo, basta utilizar a equação:

$$g_i = g_{base} + \Delta G_i, \tag{3.2}$$

em que i é o i-ésimo intervalo de leitura gravimétrica entre a estação base (i.e., o farol da DHN) e a alvo (i.e., EGG01). Por fim, apresentamos o valor da gravidade absoluta para a estação EGG01 como a média da Equação 3.2 e o respectivo desvio padrão deste experimento, conforme ilustrado pela Figura 14.

Visita	Local	Grav. Medida (mgal)	S.D	Tilt X.	Tilt Y.	Time (Brasília)	Grav. Média (mgal)	∆G (li - l1)	g (mgal)		
1	DUN	5456.418	0.040	0.7	0.5	9:28	E4E6 2002		079790 7110		
1	DHN	5456.419	0.059	-3.8	0.2	9:35	5450.5555	3430.3333	3430.3333		978789.7110
2	ECC01	5456.611	0.057	0.2	-5.7	10:07	5456 6115	0 2122	079790 0222		
2	20001	5456.612	0.051	-3.1	-1.5	10:13	5450.0115	0.2122	970709.9232		
4	ECC01	5456.594	0.049	-0.8	-3.1	11:20	5456 5070	0 1077	079790 0097		
4	20001	5456.600	0.051	-3.2	-1.7	11:27	5450.5970	0.1977	978789.9087		
6	ECC01	5456.604	0.044	1.7	-5.0	12:32	5456.6045	0.2052	079790 0162		
6	EGGUI	5456.605	0.044	-1.2	-3.2	12:37		0.2052	978789.9162		
8	ECC01	5456.599	0.053	3.7	-5.1	13:37	E4E6 6000	0.2007	079790 0117		
8	20001	5456.601	0.055	-0.5	0.0	13:43	5450.0000	0.2007	970709.9117		
10	FCC01	5456.589	0.049	1.3	-0.4	14:40		0 1042	079790 0050		
10	20001	5456.598	0.069	1.8	-3.4	14:45	5450.5955	5450.5955 0.1942	976769.9032		
	Média								978789.9130		

Figura 14 – Tabela de Dados Apresentando o Valor Final de Gravidade para a estação EGG01

3.2 Aquisição e processamento altimétrico

Neste trabalho, foi utilizada a ferramenta *online* chamada de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), disponibilizada no *website* do IBGE. Neste, a altitude física é calculada a partir do modelo de conversão hgeoHNOR2020¹. Utilizando-se desse método, podemos obter a conversão entre altitudes físicas em normais, cuja relação é similar à Equação 2.3, adaptada para o caso do quase-Geóide Imbituba utilizado como base altimétrica brasileira (Figura 15). Para mais detalhes, o leitor é convidado ao *website* do IBGE e à série de relatórios metodológicos.



Figura 15 – Ilustração do modelo de conversão de altitudes elipsoidais em físicas (https://www.ibge.gov.br/images/novoportal/dgc/hgeohnor/fig1.png)

A ferramenta de processamento do IBGE solicita que os dados de entrada sejam no formato *.rinex*, porém os dados exportados pelo Stonex S800 apresentam-se no formato

¹ Fornece a separação entre o elipsoide de referência das altitudes geométricas em SIRGAS 2000 e as superfícies de referência da realização reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais (REALT2018) da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB (data verticais de Imbituba e Santana)

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

. dat. Dessa forma, é necessário aplicar a conversão adequada aos dados exportados do Stonex para o formato rinex, conforme mostra a imagem Figura 16.

0	StaticToRir	nex	- 🗆 🗙						
Choose Path C:\Users\Rodrigo\Downloads									
File name	Antenna height 1.666M	Size 3.787M	Date 2022-9-30						
٢			>						
Rinex Version: Stonex2 1	0 V Mixed V3.02	time Interval:	Automatic						
✓ Output Ionospheric Corre	ctions I Phase	e Center	✓ Flag Cycle Slip						
Set Station Coordinate W Export System: GPS	ith Single Point Position	ou 🗹 Galileo	✔ QZSS ✔ SBAS						
Freq Band: Single Freq Multiple Freq									
PseudoRange	CarrierPhase 🗹 D	oppler 🔽	SNR						
Select All 🗹 Outp	ut path=Input path	Export	Exit						



Após a execução do aplicativo StatictoRinex, o arquivo convertido e exportado foi aplicado na página de processamento do IBGE, conforme ilustra a Figura 17. O método PPP tem sua precisão diretamente proporcional ao tempo entre a aquisição dos dados e o seu processamento, ou seja, quanto maior este espaçamento de tempo, melhor será a precisão final. Todavia existe um limite neste espaço de tempo onde aumenta-lo não melhorará o resultado final. O IBGE separa essa relação de tempo e precisão em três estágios, sendo eles o processamento Ultra-Rápido, Rápido e Final.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

 Selecione o Modo de Processame Estático O Cinemático 	Selecione um arquivo RINEX: Só serão aceitos arquivos no formato .050 a .230, .050 a .230, .05d a .23d, .05D a .23D, .0bs, .0BS, .zip, .ZIP, .tar, .TAR, .tgz, .TGZ, .gz, .GZ, .rnx, .RNX, .crx, .CRX, .7z, .7Z				
Os valores selecionados comprimidos em um ún	abaixo serão adotados para todos os RINEX que estejam ico arquivo:				
Tipo de Antena:	Altura da antena (m):				
Nao alterar RINEX	• 0.000				
	A altura da antena somente será alterada se esta caixa estiver marcada.				
E-mail válido do usuário. (não pod E-mail	e conter espaços ou tabs!):				
Concordo que os resultados d informações cartográficas e geod	os processamentos poderão ser utilizados pelo IBGE para a avaliação de produtos e ésicas, bem como para a avaliação do próprio serviço IBGE-PPP				
Nota: O processamento iniciar Caso o resultado não comece	á após a transferência do arquivo, o que pode demorar alguns minutos. a aparecer em 2 horas, por favor reprocesse.				
Processar Limpar Da	dos				



3.3 Modelos globais de gravidade (MGGs)

Para complementar o trabalho apresentado até aqui, utilizamos um modelo global de gravidade específico, chamado de EIGEN-6C4, que permite, via expansão em harmônicos esféricos, calcular a gravidade absoluta para as estações EGG01 e farol da DHN. Dentro do banco de dados do ICGEM, há uma série de modelos que calculam elementos da gravidade. Dentre eles, foi utilizado o modelo EIGEN-6C4. Este foi escolhido por se tratar do modelo de gravidade global que possui expansão em harmônicos esféricos de maior grau e ordem, iguais a 2190, em comparação com outros existentes. Trata-se do maior truncamento proposto e que, portanto, melhor representa os sinais de alta frequência contidas nos dados de gravidade. Deste modelo, foram utilizados os funcionais *gravity_earth* e *gravity* associados às estações, respectivamente. Para mais detalhes, o leitor é convidado ao (BARTHELMES, 2014; INCE et al., 2019).

Neste caso, utilizamos os valores absolutos obtidos pelo ICGEM para complementar a análise do valor absoluto obtido para a estação EGG01. Consequentemente, as reduções gravimétricas dadas pelas Equações 2.1 e 2.2 também são utilizadas e comparadas para as estações.

4 Resultados

Neste capítulo apresentamos uma breve análise da gravidade absoluta obtida pela transferência gravimétrica de primeira ordem, realizada entre o Farol da DHN e a estação EGG01. Comparativamente, utilizamos o Modelo Global de Gravidade EIGEN 6C4 para calcular o valor da gravidade absoluta para as duas estações gravimétricas supracitadas. Por fim, calculamos as anomalias de ar-livre e Bouguer simples para ambas as estações, uma vez que medidas das coordenadas planialtimétricas de ambas as estações foram coletadas, permitindo assim que algumas reduções gravimétricas fossem realizadas. Dessa forma, podemos verificar conceitualmente se o valor de gravidade absoluto é consistente.

4.1 Altimetria

Nesta trabalho, as três etapas foram executadas para fins de análise, entretanto apenas o processamento final foi considerado nos cálculos dos resultados. A Figura 18 mostra, em metros, os valores obtidos para a altitude normal, o fator de conversão e a incerteza altimétrica da nova estação EGG01.

Coordenada Altimétrica							
Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA						
Fator para Conversão (m):	-6,13	Incerteza (m):	0,05				
Altitude Normal (m):	5,59						

Figura 18 – Altimetria da estação EGG01 obtida no site do IBGE: modelo altimétrico de referência, fator de conversão de superfícies, altitude normal e incerteza.

Após aplicarmos o processamento disponível pelo IBGE, obtemos a altitude normal da nossa estação. Como essa altitude está referida ao modelo hgeoHNOR2020, será necessário também calcular a altitude normal da EGA farol da DHN, cuja altitude geométrica é a única grandeza conhecida.

 Ou insira as coordenadas via teclado observando as instruções abaixo:

 1) O campo 'graus' deverá ser preenchido, mesmo que seja zero.

 2) Os campos 'minutos' e 'segundos', se não preenchidos, serão considerados nulos.

 3) Obrigatoriamente, o campo 'segundos' tem ponto decimal e os campos 'graus' e 'minutos' são inteiros.

 Latitude (GMS)

 -22
 53

 04.4118

 Longitude (GMS)

 -43
 8.0

 018348

Figura 19 – Cálculo da Ondulação Geoidal da Estação Farol DHN

Para obter a altitude normal de um dado ponto, basta apenas conhecer a altitude geométrica e o fator de conversão associado. Este pode ser obtido diretamente do site do IBGE, a partir da latitude e longitude, conforme mostra a Figura 19. Desta forma, obtemos a altitude normal do farol da DHN e portanto teremos todos nossos cálculos de altitude referidos ao modelo hgeoHNOR2020.

4.2 Gravidade absoluta

A gravidade absoluta para a estação EGG01 é obtida através da Equação 3.2, é apresentado na Figura 20.

Grav. Absoluta EGG01 (mgal)

978789.9130 ± 0.054

Figura 20 – Gravidade Absoluta da Estação EGG01 Calculada Pelo Método de Transferencia de Estação Gravimétrica de Primeira Ordem.

O desvio padrão é calculado em função da média aritimética do Standard Deviation (S.D.) mensurado pelo próprio gravímetro, referente aos valores de cada visita executada ao longo da transferência de base gravimétrica. A Tabela 1 apresenta as informações acerca das coordenadas Geodésicas Geocêntricas de observação, além da altitude normal obtida em relação ao quase-geóide Imbituba (H_n) e a gravidade absoluta medida e calculada pelo modelo EIGEN 6C4 para as estações.

Estação	Farol da DHN (Base)	EGG01
Latitude decimal $(^{o})$	-22.884559	-22.906104
Longitude decimal (°)	-43.133843	-43.133879
Altitude Normal Imbituba (m)	22.4945	5.5900
Gravidade absoluta $(mGal)$	978789.7110	978789.9102
Gravidade absoluta EIGEN 6C4 $(mGal)$	978784.4025	978784.5328

Tabela 1 – Tabela com as coordenadas planialtimétricas observadas e as gravidades absolutas das estações base(Farol da DHN) e EGG01.

É importante comentar que as duas estações possuem longitudes muito semelhantes, além de serem costeiras. As altitudes normais diferem cerca de 17 metros, fato um pouco inesperado devido à proximidade de ambas as estações da Baia da Guanabara. A diferença entre a gravidade absoluta e a calculada pelo EIGEN 6C4 é de 5.308 mGal para o Farol da DHN e de 5.377 mGal para a estação EGG01. Essa semelhança observada na diferença entre as gravidades absolutas pode estar relacionada com algum tipo de tendência imposta pelo modelo de harmônicos esféricos utilizado pelo EIGEN 6C4. Embora menos relevante para nosso trabalho, há também incertezas nas observações das latitudes e longitudes, além de 0.05 metros de incerteza na determinação da altitude normal de Imbituba Hn. Em linhas gerais, é possivel averiguar bastante consistência entre os valores teóricos e os observados neste trabalho durante a etapa de transferência de base gravimétrica.

4.3 Anomalias gravimétricas

Seguindo a mesma diretriz apresentada na seção anterior, apresenta-se, na Tabela 2 os valores de anomalias gravimétricas relevantes para validação da metodologia apresentada neste trabalho. Vale salientar que, para o caso da anomalia da gravidade, utilizamos a expressão apresentada no trabalho de Li e Götze (2001).

Para o cálculo das anomalias de ar-livre e Bouguer simples, foram utilizadas as Equações 2.1 e 2.2, respectivamente. No caso dos dados modelados pelo EIGEN 6C4, utilizamos a base de cálculos disponível no site (http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints) e definimos que a expansão em harmônicos esféricos seja de grau n = 2190.

Estação	Farol da DHN (Base)	EGG01
Anomalia da gravidade $(mGal)$	-20.930	-25.446
Anomalia da gravidade EIGEN 6C4 $(mGal)$	-29.434	-28.971
Ar-Livre $(mGal)$	-17.735	-25.573
Ar-Livre EIGEN $6C4 \ (mGal)$	-26.239	-29.098
Bouguer simples $(mGal)$	-18.893	-25.541
Bouguer simples EIGEN 6C4 $(mGal)$	-27.397	-29.066

Tabela 2 – Tabela com as anomalias calculadas para as estações gravimétricas.

Observe que as anomalias são negativas para ambas as estações. Adicionalmente, as anomalias da gravidade do ICGEM são bastante discrepantes das medidas. Um aspecto animador que deve ser mencionado é o fato das anomalias de ar-livre e Bouguer simples para as estações EGG01 e Farol da DHN serem bastante similares. Esse aspecto é esperado pela teoria, já que nas regiões próximas ao mar, a superfície física se confunde com o relevo do nível médio do mar (i.e., o Geóide).

5 Conclusões

O presente trabalho utiliza a técnica da transferência de base gravimétrica de primeira ordem para estabelecer uma estação de gravidade absoluta, chamada de EGG01, na garagem do bloco P do Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense. Para isso, o gravímetro relativo CG-5 Autograv da empresa canadense Scintrex foi utilizado durante cinco visitas, realizadas no dia 07 de Dezembro de 2021, ao farol da DHN, cuja gravidade absoluta é conhecida. Complementarmente à transferência de estação gravimétriva, utilizamos o *Global Navigation Satelite System*, GNSS em inglês, da empresa Stonex para medir as coordenadas planialtimétricas da nova estação absoluta. Com essas informações, foram calculadas as anomalias da gravidade, ar-livre e Bouguer simples para as estações do Farol da DHN e EGG01, cujo propósito é validar o valor de gravidade absoluto medido. O procedimento também fornece o desvio padrão da gravidade absoluta, cujo valor é absolutamente aceitável em relação à precisão exigida pelo tipo de trabalho. Dessa forma, é possivel afirmar que o valor da gravidade absoluta é bastante consistente, já que as anomalias de ar-livre e Bouguer observadas apresentaram valores similares, fato considerado bastante coerente com a localização de ambas as estações.

Destaca-se a importância do trabalho apresentado já que aquisições gravimétricas terrestres localizadas nos arredores da nova estação EGG01 podem usá-la como base absoluta. Outro aspecto importante é a possibilidade da estação EGG01 ser incorporada à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB), cuja ingerência deve-se ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e ao Observatório Nacional (ON/MCTIC).

Como perspectiva futura podemos indicar o uso do gravímetro absoluto do Observatório Nacional para que a gravidade absoluta possa ser determinada por outra metodologia, considerada mais acurada e ideal para os fins deste trabalho. Vale pontuar também a importância deste documento, já que durante a fase de busca por referências bibliográficas sobre o tema, pouquissimos trabalhos com metodologia adequadamente descrita foi encontrado.

Referências

ANGELIS, M. de et al. Measurement of absolute gravity acceleration in firenze. *Solid Earth Discussions*, Copernicus GmbH, v. 3, n. 1, p. 43–64, 2011.

ARAÚJO, R. L. d. Gravimetria e exploração de petróleo na bacia de santos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

BARTHELMES, F. Global models. *Encyclopedia of Geodesy, Springer International Publishing*, p. 1–9, 2014.

BLAKELY, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications. [S.I.]: Cambridge university press, 1996.

CAMACHO, A. G. et al. Investigación gravimétrica para estudio arqueológico en la cueva de maltravieso (cáceres). Universidad Politécnica de Valencia, 2003.

CARGNELUTTI, J. et al. Fundamentos conceituais da determinação do geóide pelo método gravimétrico. Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

CATALÃO, J.; SEVILLA, M. A inversao de dados altimétricos no contexto da modelação do campo gravítico. In: Actas II Conferencia Nacional de Cartografía e Geodesia. IPCC Lisboa. pp. [S.l.: s.n.], 2000. v. 320, p. 328.

CORREIA, C. A. et al. Evolução da infraestrutura gravimétrica no brasil. *Geosciences= Geociências*, v. 37, n. 2, p. 361–384, 2018.

ESCOBAR, I. P. Forma e dimensões da terra. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Cartográfica, 2000.

FERNANDES, C.; ROCHA, P.; COUTINHO, M. A necessidade de uma correção de anomalia na interpretação gravimétrica para geologia de engenharia. In: EUROPEAN ASSOCIATION OF GEOSCIENTISTS & ENGINEERS. 2nd International Congress of the Brazilian Geophysical Society. [S.l.], 1991. p. cp–316.

FERREIRA, R. U. R. Contribuição de dados aeromagneticos para o estudo do complexo granítico caçapava do sul. Universidade Federal do Pampa, 2016.

FONSECA, H. C.; TERRA, E. F. L.; SANTOS, A. A. dos. Conducting an absolute gravity base tie in other to measure the reference gravity value at the marine gravity system-6 installed on the hydro-oceanographic research ship vital de oliveira (h39). In: BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 31 July-3 August 2017. [S.1.], 2017. p. 1083–1085.

GEMAEL, C. Introdução à geodésia física. *Curitiba: Editora da UFPR*, v. 302, p. 2002, 1999.

GUIMARÃES, G. d. N. A altimetria e o modelo geoidal no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.

GUIMARÃES, G. do N. et al. 30 anos de medições gravimétricas absolutas no brasil. *Rev. Bras. Cartogr*, v. 72, n. 1, 2020.

HUGILL, A.; VALLIANT, H. Limitations to the application of electrostatic feedback in gravity meters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley Online Library, v. 91, n. B8, p. 8387–8392, 1986.

INCE, E. S. et al. Icgem–15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth System Science Data*, Copernicus GmbH, v. 11, n. 2, p. 647–674, 2019.

JUNIOR, C. A. Corrêa e C. *Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul.* Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.

JÚNIOR, J. A. da S. et al. Análise de acurácia altimétrica para dados alos palsar e aster gdem para o município do recife-pe. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 10, n. 2, p. 117–139, 2022.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to geophysical exploration. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002. v. 4.

LI, X.; GÖTZE, H.-J. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 66, n. 6, p. 1660–1668, 2001.

LOPES, A. B. O geóide gravimétrico e o nível médio do mar na região do datum altimétrico brasileiro: um estudo comparativo. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 25, p. 96–96, 2007.

MENEZES, R. O. et al. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de juiz de fora, minas gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 24, p. 271–282, 2019.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo Navstar-GPS. [S.l.]: Unesp, 2002.

REYNOLDS, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

SILVA, S. T. d. et al. Refinamento do modelo geoidal brasileiro e criação do modelo de anomalia de altura por meio de geoestatística para a cidade de itaqui/rs. Universidade Federal do Pampa, 2018.

SOUSA, M. A. d.; SANTOS, A. A. d. Absolute gravimetry on the agulhas negras calibration line. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 28, p. 165–174, 2010.

TELFORD, W. M. et al. Applied geophysics. [S.l.]: Cambridge university press, 1990.

TIMMEN, L.; GITLEIN, O. The capacity of the scintrex autograv cg-3m no. 4492 gravimeter for "absolute-scale" surveys. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 56, n. 2, p. 89–95, 2004.

TORGE, W. Gravimetry. In its Natl. Rept. of Federal Republic of Germany on Geodetic Activities, p. 128–139, 1983.

VITUSHKIN, L. F. Absolute gravity measurements. *Encyclopedia of Geodesy, E. Grafarend (ed.), Springer, Cham*, 2014.

WATTS, A. B. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2001.

WILLIAM, L. Fundamentals of geophysics. Cambridge University Press, 2007.