

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JAQUELINE PRUNZEL

CONTRIBUIÇÕES PARA A IMPLANTAÇÃO DE REDE VERTICAL DE
REFERÊNCIA NO LITORAL DO PARANÁ, BASEADA EM NÚMEROS
GEOPOTENCIAIS

CURITIBA

2022

JAQUELINE PRUNZEL

CONTRIBUIÇÕES PARA A IMPLANTAÇÃO DE REDE VERTICAL DE
REFERÊNCIA NO LITORAL DO PARANÁ, BASEADA EM NÚMEROS
GEOPOTENCIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Profa. Dra. Regiane Dalazoana.

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Prunzel, Jaqueline

Contribuições para a implantação de rede vertical de referência no litoral do Paraná, baseada em números geopotenciais / Jaqueline Prunzel. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Regiane Dalazoana

1. Altitudes – Levantamento. 2. Gravidade. 3. Gravimetria. 4. Rede altimétrica. 5. Números geopotenciais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Dalazoana, Regiane. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JAQUELINE PRUNZEL** intitulada: **CONTRIBUIÇÕES PARA A IMPLANTAÇÃO DE REDE VERTICAL DE REFERÊNCIA NO LITORAL DO PARANÁ, BASEADA EM NÚMEROS GEOPOTENCIAIS**, sob orientação da Profa. Dra. REGIANE DALAZOANA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica

23/08/2022 08:58:24.0

REGIANE DALAZOANA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/08/2022 17:55:05.0

ALEXANDRE BERNARDINO LOPES

Avaliador Externo (55001149)

Assinatura Eletrônica

22/08/2022 14:35:35.0

PEDRO LUIS FAGGION

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*“Não há noite tão escura que jamais
encontre o dia.”*

Victor Hugo

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento especial a minha orientadora Dr^a. Regiane Dalazoana por toda a paciência, dedicação, cooperação, apoio e compreensão em todas as etapas desta jornada.

Ao meu professor Dr. Alexandre Bernardino Lopes pela amizade, críticas e sugestões que se fez presente em todos os momentos desde o início do trabalho.

Ao Professor Dr. Pedro Faggion e ao Professor Dr. Wander que me acompanharam nas coletas de dados realizadas em Pontal do Paraná e por todo auxílio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Dr. Pedro Faggion pelos bons conselhos, advertências e todo ensinamento.

Ao Professor Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior por todo apoio e ter acreditado na realização deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, cuja disciplinas ofertadas foram de grande aprendizado.

A minha família pelo carinho e apoio.

RESUMO

Com o reajustamento da rede altimétrica brasileira baseado em números geopotenciais, foi possível atualizar a componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB a partir de dados de nivelamento geométrico de alta precisão e gravimetria. Este reajustamento realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) proporcionou a determinação de altitudes normais para as referências de nível que compõem a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). Estas altitudes possuem significado físico e constituem-se num primeiro passo rumo a uma unificação com referenciais globais tal como o IHRS/IHRF (*International Height Reference System/Frame*), além de atender aos requisitos do SIRGAS (Sistema Geodésico de Referência para as Américas). O presente trabalho mostra os aspectos teóricos, matemáticos e operacionais do desenvolvimento de um levantamento de dados para fins geodésicos, de marcos de referência vertical do sistema altimétrico, utilizando técnicas de gravimetria e do nivelamento geométrico de alta precisão. A metodologia utilizada para as mensurações segue as recomendações de preceitos e aplicabilidade de técnicas do IBGE, objetivando altitudes físicas baseadas no número geopotencial para um conjunto de 8 marcos implantados no Litoral do Paraná, no município de Pontal do Paraná. Além de nivelamento geométrico e gravimetria, também foi realizado o levantamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) dos marcos pela técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Os resultados encontrados para as altitudes normais dos marcos foram comparados com as altitudes normais obtidas a partir da conversão das altitudes elipsoidais em altitudes normais utilizando o modelo hgeoHNOR disponibilizado pelo IBGE, as diferenças encontradas variam entre 1,12cm e 16,41cm.

Palavras-chave: Número geopotencial. Gravidade. Rede altimétrica.

ABSTRACT

With the readjustment of the Brazilian altimetric network based on geopotential numbers, it was possible to update the vertical component of the Brazilian Geodetic System - SGB from high precision geometric leveling and gravimetry data. This readjustment carried out by the IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics) provided the determination of normal altitudes for the level references that make up the High Precision Altimetric Network (RAAP). These altitudes have physical meaning and constitute a first step towards unification with global references such as the IHRF/IHRF (International Height Reference System/Frame), in addition to meeting the requirements of SIRGAS (Geodetic Reference System for the Americas). The present work shows the theoretical, mathematical and operational aspects of the development of a data survey for geodetic purposes, of vertical reference marks of the altimetric system, using techniques of gravimetry and high-precision geometric leveling. The methodology used for the measurements follows the recommendations of precepts and applicability of IBGE techniques, aiming at physical altitudes based on the geopotential number for a set of 8 landmarks implanted on the Paraná Coast, in the municipality of Pontal do Paraná. In addition to geometric leveling and gravimetry, a GNSS (Global Navigation Satellite System) survey of landmarks was also carried out using the Precise Point Positioning (PPP) technique. The results found for the normal altitudes of the landmarks were compared with the normal altitudes obtained from the conversion of ellipsoidal altitudes into normal altitudes using the hgeoHNOR model provided by IBGE, the differences found vary between 1.12cm and 16.41cm.

Keywords: Geopotential number. Gravity. Altimetric network.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DATUM ALTIMÉTRICO CLÁSSICO E SUA OBTENÇÃO.....	21
FIGURA 2 - VISÃO MODERNA RELACIONADA AO DATUM VERTICAL.	23
FIGURA 3 - DISCREPÂNCIAS ENTRE OS DATA VERTICAIS DOS PAÍSES DA AMÉRICA DO SUL E O VALOR DE GEOPOTENCIAL W_0	24
FIGURA 4 - ALTITUDE COMO FUNÇÃO DE UMA DIFERENÇA DE POTENCIAL DA GRAVIDADE.....	25
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DA ALTITUDE ORTOMÉTRICA.....	28
FIGURA 6 - ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA DEFINIÇÃO DAS ALTITUDES NORMAIS.	29
FIGURA 7 - REDE ALTIMÉTRICA DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO.....	32
FIGURA 8 - MÉTODO DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO COM VISADAS IGUAIS.	33
FIGURA 9 - ERRO DE COLIMAÇÃO E CURVATURA TERRESTRE.	34
FIGURA 10 - LANCE DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.	35
FIGURA 11 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GRAVIMETRO RELATIVO..	38
FIGURA 12 - GRAVIMETRO DIGITAL CG-5.	39
FIGURA 13 - ATRAÇÃO LUNI-SOLAR, CONFORME O POSICIONAMNETO SOL A LUA E A TERRA.	41
FIGURA 14 - CIRCUITOS GRAVIMÉTRICOS.	43
FIGURA 15 - ANOMALIA DA GRAVIDADE.	44
FIGURA 16 - REDUÇÃO GRAVIMÉTRICA.....	45
FIGURA 17 - REDE ALTIMÉTRICA E GRAVIMÉTRICA NA ÁREA DE ESTUDO...	47
FIGURA 18 - MAPA DA ÁREA DE ESTUDO.	48
FIGURA 19 - A) CHAPA IDENTIFICADORA CRAVADA EM CONCRETO; B) IDENTIFICADOR GEODÉSICO.....	49
FIGURA 20 - CHAPA METÁLICA, IDENTIFICADOR GEODÉSICO.....	49
FIGURA 21 -EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA O NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.	51
FIGURA 22 - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE PRIMEIRA ORDEM.....	52
FIGURA 23 - GRAVÍMETRO SCINTREX CG-5.	53
FIGURA 24 - RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA RN: 2049M.	55
FIGURA 25 - ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA ABSOLUTA EM CURITIBA.....	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO POR SEÇÃO E ALTITUDES NIVELADAS.	54
TABELA 2 - LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO – OUTUBRO DE 2019.....	57
TABELA 3 – CONVERSÃO DE ALTITUDES ELIPSOIDAIAS EM ALTITUDES ORTOMÉTRICAS COM O USO DO MAPGEO2015.....	58
TABELA 4 - ALTITUDES ORTOMÉTRICAS NORMAIS CALCULADAS.	58
TABELA 5 - LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO - ABRIL DE 2019.....	59
TABELA 6 - NÚMEROS GEOPOTENCIAIS E ALTITUDES NORMAIS.....	61
TABELA 7 - COMPARAÇÃO DAS ALTITUDES NORMAIS CALCULADAS.....	61
TABELA 8 - COMPARAÇÃO DAS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS E ALTITUDES NORMAIS.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DV	- <i>Datum Vertical</i>
ECOSOC	- Conselho Econômico e Social das Nações Unidas
GGOS	- <i>Global Geodetic Observing System</i>
GGRF	- <i>Global Geodetic Reference Frame</i>
GGRS	- <i>Global Geodetic Reference System</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GRS80	- <i>Geodetic Reference System 1980</i>
IAG	- <i>International Association of Geodesy</i>
IAGS	- <i>Inter American Geodetic Survey</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICGEM	- <i>International Center for Global Gravity Field Models</i>
IGSN	- <i>International Gravity Standardization Net</i>
IHRF	- <i>International Height Reference Frame</i>
IHRS	- <i>Internacional Height Reference System</i>
NMM	- Nível Médio do Mar
PSMSL	- <i>Permanent Service for Mean Sea Level</i>
RAAP	- Rede Altimétrica de Alta Precisão
RGRC	- Rede Geodésica de Referência Costeira
RMPG	- Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RN	- Referência de Nível
RRCM	- Rede de Referência Cadastral Municipal
RRNN	- Referências de Nível
RVRB	- Rede Vertical de Referência do Brasil
SGB	- Sistema Geodésico Brasileiro
SGR	- Sistema Geodésico de Referência
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico Geodésico para as Américas
TNMM	- Topografia do Nível Médio do Mar
UN-GGIM	- <i>United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	15
1.2.	OBJETIVOS	19
1.2.1.	Objetivo Geral	19
1.2.2.	Objetivos Específicos	19
1.3.	JUSTIFICATIVA	20
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1.	SISTEMAS DE ALTITUDES	21
2.1.1.	Número geopotencial	24
2.1.2.	Tipos de altitudes: Ortométrica, Dinâmica e Normal	27
2.1.2.2.	Altitude Ortométrica	27
2.1.2.3.	Altitude Normal	29
2.2.	REDE VERTICAL DE REFERÊNCIA DO BRASIL.....	30
2.3.	NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	32
2.3.1.	Nivelamento Geométrico de Alta Precisão	34
2.3.2.	Rede geodésica de referência costeira.....	36
2.4.	GRAVIMETRIA.....	37
2.4.1.	Correção de Maré Terrestre	39
2.4.2.	Correção de deriva estática e dinâmica.....	41
2.4.3.	Anomalia De Bouguer	44
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1.	ÁREA DE TRABALHO.....	48
3.2.	MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NO LEVANTAMENTO DOS MARCOS GEODÉSICOS	50
3.2.1.	Nivelamento Geométrico de alta precisão	50
3.2.2.	Levantamento Gravimétrico.....	52
4.	RESULTADOS.....	54
4.1.	NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTA PRECISÃO.....	54
4.2.	LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO	56
4.3.	NÚMEROS GEOPOTENCIAIS E ALTITUDES NORMAIS.....	60
5.	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
	REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da altitude é fundamental em diversas aplicações na área de engenharia, agronomia, arquitetura e no setor produtivo. O conhecimento da altitude de um conjunto de marcos no terreno é essencial em projetos de irrigação, esgoto, estradas, terraplanagem, planejamento urbano, na elaboração de projetos de monitoramento e prevenção de desastres que visam evitar danos ao meio ambiente, às vidas humanas e danos financeiros ocasionados por deslizamentos e/ou alagamentos, por exemplo (LUZ, 2008).

Sob o ponto de vista clássico, a determinação de altitudes visando o estabelecimento de redes de referência altimétrica era feita por meio de técnicas convencionais como o nivelamento geométrico e onde as altitudes são vinculadas a um *Datum* Vertical local. Esse *Datum* Vertical (DV) era definido com base no chamado Nível Médio dos Mares (NMM) numa determinada estação maregráfica e numa determinada época. No entanto, essas altitudes não apresentam vínculo com o campo da gravidade da Terra. Em vários países da América do Sul, para contornar esse obstáculo, considerava-se a gravidade teórica na determinação de uma correção devido ao não paralelismo das superfícies equipotenciais que era aplicada aos desníveis medidos em campo. Esta correção, denominada de correção ortométrica-normal ou normal-ortométrica, considera o campo da gravidade teórica ou gravidade normal, gerado a partir do modelo de Terra Normal (DE FREITAS; BLITZKOW, 1999).

O modelo Terra Normal foi o primeiro modelo gravitacional da Terra, desenvolvido a partir de estudos teóricos realizados por Clairaut, Helmert, Somigliana, entre outros pesquisadores (NICACIO; DALAZOANA, 2017). Seu propósito é representar a Terra Real por meio de um elipsoide de revolução. O modelo Terra Normal considera a mesma massa e a mesma velocidade angular de rotação da Terra Real, sua origem coincide com o centro de massa médio da Terra, e o semieixo menor b coincide com o eixo de rotação médio da Terra (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005).

Segundo uma visão moderna, as altitudes, com sentido prático e com significado físico, devem estar relacionadas a uma diferença de potencial. Essa diferença de potencial considera o valor do geopotencial sobre uma superfície de referência global (geoide) W_0 e o valor do geopotencial no ponto de interesse W_P . De acordo com a Resolução N° 1 de 2015 da IAG (*International Association of Geodesy*),

a superfície equipotencial global é definida pelo valor convencional de $W_0 = 62636853,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (DREWES et al., 2016). Essa diferença de potencial da gravidade ($W_0 - W_P$) é denominada de número geopotencial (C_P) que, na prática, pode ser obtido da associação do nivelamento geométrico de precisão com gravimetria. Nesse caso, é calculado a partir dos valores de desníveis (ΔH) e valores médios de gravidade (\bar{g}) observados em cada seção nivelada sobre a superfície física da Terra (DE FREITAS; BLITZKOW, 1999; DREWES et al., 2016; IHDE et al., 2017; RIBEIRO et al., 2021).

A determinação de desníveis entre dois pontos sobre a superfície terrestre é uma das operações fundamentais da Geodésia. Comumente os desníveis podem ser medidos por técnicas de nivelamento, as quais compreendem métodos diretos ou métodos indiretos. Nos métodos diretos, os desníveis são medidos com o auxílio de equipamentos instalados diretamente sobre o terreno, ou seja, miras são colocadas verticalmente nos referidos pontos onde são realizadas leituras de altura e calculadas as respectivas diferenças (desníveis). Nos métodos indiretos, são observadas outras quantidades, tais como ângulos (zenital), distância inclinada, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e por meio de cálculos matemáticos são determinados os desníveis. Também é possível determinar o desnível entre dois pontos de forma indireta com posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Segundo Monico (2008), o GNSS é um sistema de rádio navegação com ampla aplicação (como geodinâmica, navegação, entre outros) que fornece altitudes e diferenças de nível de natureza geométrica (h), ligadas à modelagem matemática da Terra, segundo o elipsoide de referência, diferentemente de altitudes niveladas (H), ligadas ao campo da gravidade da Terra e sua modelagem matemática segundo superfícies equipotenciais (NICACIO et al., 2018).

Em contexto histórico, o início da implantação da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) se deu em meados da década de 1940, quando foram iniciados os levantamentos de nivelamento geométrico de alta precisão do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) na estação maregráfica de Torres, no Rio Grande do Sul. Em 1958 o *Datum* de Torres foi substituído pela Estação maregráfica de Imbituba, localizada em Santa Catarina, denominado de *Datum* de Imbituba. A substituição ocorreu devido ao fato do marégrafo de Imbituba apresentar mais anos de observações do nível do mar. Existe ainda o *Datum* de Santana, no estado do Amapá, o qual não foi possível conectar ao

Datum de Imbituba, originando assim um *Datum* independente para a rede altimétrica do Amapá (IBGE, 2018).

Nos anos 1990 concluiu-se o primeiro ajustamento automatizado e integral da Rede Vertical Brasileira pelo método tradicional dos mínimos quadrados. Posteriormente, em 2011, foi feito outro ajustamento que resultou em altitudes e desvio padrão para as mesmas. Vale ressaltar que apenas a correção do efeito sistemático do não paralelismo das superfícies equipotenciais foi aplicada aos desníveis observados, resultando em altitudes denominadas de ortométricas-normais (IBGE, 2018).

Em 2018 a RAAP sofreu um reajustamento com reformulação dos procedimentos para obtenção das altitudes, considerando as observações de gravidade sobre as Referências de Nível (RRNN). Este reajustamento baseado em números geopotenciais permitiu a determinação de altitudes com significado físico (altitudes normais) (IBGE, 2018). Nesse sentido, o presente trabalho faz uso de dados de gravidade e de desníveis observados para determinar as altitudes normais, a partir dos números geopotenciais, de um conjunto de marcos implantados na cidade de Pontal do Paraná, localizada na zona litorânea do estado. Vale ressaltar que esta região carece de infraestrutura geodésica para apoio às mais diversas atividades que necessitam de informação georreferenciada.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

As zonas de costa brasileira apresentam vários interesses como: energético, científico, ambiental, geohistórico, entre outros. Com o avanço tecnológico, a expansão urbana e os fenômenos climáticos e de globalização, as zonas costeiras se tornam cada vez mais sensíveis a ações climáticas e a atividades humanas. As cidades costeiras em geral estão situadas a 10 m acima do NMM e o crescimento desordenado e as mudanças climáticas expõem estas cidades à uma série de efeitos como o aumento do nível médio do mar, inundações costeiras, ondas de calor, intensidade de tempestades e aumento de temperatura dos oceanos, por exemplo. Por isso, para monitoramento destes fenômenos é necessário o estabelecimento de referenciais adequados (MARENGO; SCARANO, 2016; BRASIL, 2021).

Estes referenciais são necessários pois o sistema Terra é um sistema dinâmico, que sofre por influências dos deslocamentos de placas tectônicas, movimento de rotação, marés terrestres e oceânicas, dentre outros. O aumento da temperatura ao longo dos anos, provocado pelo aumento de gases na atmosfera, está relacionado ao derretimento de geleiras em montanhas e calotas polares. Essa conjuntura, que ocasiona o aumento da temperatura das águas dos oceanos, também contribui para a elevação do nível do mar, causando uma redistribuição de massas no planeta, e conseqüente variação no campo gravitacional e portanto no geóide (BLITZKOW; MATOS, 2011).

Estudos relacionados com a dinâmica do planeta Terra são amparados pela Geodésia que é a ciência que tem o objetivo de determinar a forma, a dimensão e o campo de gravidade da Terra (GEMAEL, 1999). Em termos práticos, a Geodésia aplicada se ocupa da determinação precisa da posição de pontos na superfície terrestre, determinação de altitudes e apoio ao mapeamento em geral (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005). Os avanços tecnológicos e a viabilidade de métodos computacionais permitiram a detecção de efeitos globais e da geodinâmica, em aspectos geocinemáticos, variações no campo da gravidade e na rotação da Terra (DA SILVA; DE FREITAS, 2019). Entretanto, vale ressaltar que se faz necessária a compreensão tanto do sentido geométrico quanto do sentido físico sobre as modificações do Sistema Terra ao longo do tempo. Desse modo é fundamental a adoção de um Sistema Geodésico de Referência Global que abarque de forma integrada aspectos geométricos e físicos (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017; DA SILVA; DE FREITAS, 2019; DALAZOANA; DE FREITAS, 2020; NICACIO; DALAZOANA, 2019).

Nesse contexto, a Geodésia em escala global permite melhor acompanhamento de mudanças climáticas, gestão de desastres naturais, aplicações práticas nos segmentos da agricultura, transporte, construção, dentre outras atividades. Sendo assim, em 26 de fevereiro de 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou a resolução sobre o Referencial Geodésico Global (GGRS/GGRF – *Global Geodetic Reference System/Global Geodetic Reference Frame*). Este referencial inclui geometria, campo da gravidade da Terra e orientação da Terra em relação ao referencial celeste, estabelecendo desta forma uma infraestrutura de referência geodésica mundial precisa, consistente, robusta e homogênea para as mais diversas finalidades, permitindo a interrelação de medições em qualquer ambiente da Terra. Proporcionando assim aplicações como variação do nível do mar,

monitoramento de mudanças climáticas e desastres naturais bem como a gestão dos mesmos, permitindo desenvolvimento sustentável (COSTA; FORTES 2019; INDE, 2015).

A definição e realização de um Referencial Geodésico Global é elemento de sustentação sobre o qual são estabelecidos Sistemas de Monitoramento do Planeta Terra, tal como o GGOS (*Global Geodetic Observing System*) da IAG. Este foi instituído para fornecer a estrutura geodésica necessária para monitorar o Sistema Terra e para as pesquisas de mudanças globais. Sendo assim são discutidos três temas centrais, o primeiro sendo *Unified Height System*, o segundo *Geohazards Monitoring*, o terceiro *Geodetic Space Weather Research* (GGOS, 2020). Um dos aspectos mais discutidos, referente às mudanças climáticas globais, está associado à evolução do NMM, principalmente visando as áreas costeiras devido aos impactos diretos causados pela expansão urbana (DA SILVA; DE FREITAS, 2019).

O primeiro tema do GGOS (*Unified Height System*) é fundamental para a definição e realização de um Sistema Vertical de Referência Global (IHRS/IHRF - *International Height Reference System/ International Height Reference Frame*) que forneça suporte às mais diversas atividades incluindo aqui o monitoramento de áreas costeiras. Nesse sentido, o DV precisa estar relacionado à uma superfície de referência global única. Para tanto, deve ser tomada como referência uma superfície equipotencial do campo da gravidade definida a partir de um valor de potencial da gravidade (W_0), com as coordenadas verticais primárias definidas com base no número geopotencial (DA SILVA; DE FREITAS, 2019; NICACIO; DALAZOANA, 2019).

Porém, grande parte dos *Data* Verticais da América do Sul foram definidos na década de 1940 e 1950, pelo conceito clássico, utilizando as observações do nível do mar por um período mínimo de 9 anos, definindo assim a superfície de referência com altitude zero para vínculo das redes altimétricas nacionais. Usualmente, as redes foram estabelecidas por nivelamento geométrico. Porém, não era considerada a influência da gravidade, o que significa que as altitudes não tinham significado físico. Para contornar esse problema, a correção teórica da gravidade foi introduzida, ou seja, a correção devido ao não paralelismo das superfícies equipotenciais. No entanto, essa correção teórica não utiliza o valor observado da gravidade, sendo aplicada diretamente sobre as medidas de desníveis (DE FREITAS, 2007).

Posto isso, as novas concepções relacionadas à definição e obtenção de altitudes com significado físico devem ser aplicadas as redes verticais nacionais

clássicas já existentes visando atender a estas demandas internacionais. Porém, vale ressaltar que nos dias atuais, ainda há grandes dificuldades em atender todas as demandas exigidas pelo GGOS, como por exemplo (SANCHEZ; SIDERIS, 2017):

- precisão milimétrica,
- estabilidade e homogeneidade duradouras,
- remoção de inconsistências relacionadas à geometria terrestre e ao seu campo da gravidade, e
- o esboço de padrões que permitam definição e realização consistentes.

Um dos grandes desafios está justamente no estabelecimento do IHRS/IHRF com vistas a atender tais demandas. A integração dos *Data* verticais é um problema complexo, pois envolve uma diversidade de grandezas geométricas e físicas. Os *Data* Verticais clássicos na América do Sul utilizaram critérios particulares, como diversidade de épocas de referência, falta de acompanhamento temporal, tanto do movimento da crosta quanto do nível do mar, diferentes processos de nivelamento e reduções empregadas, causando diferenças de altitudes entre países vizinhos para o mesmo ponto.

No caso do Brasil, o SGB é a referência para o posicionamento de alta precisão. Para o posicionamento vertical e suas especificidades a referência é dada pelas estações da RAAP do SGB, denominadas Referências de Nível (RRNN). No período de 1945 até 2017 as altitudes da RAAP foram determinadas segundo a visão clássica. Após as recomendações científicas da IAG e de acordo com os objetivos do Projeto SIRGAS, e em vista da grande importância da modernização da componente vertical do SGB, bem como a relevância das altitudes físicas, o IBGE realizou um novo ajustamento da rede vertical, com o intuito de atender a demanda internacional do GGOS (DREWES, 2009; IBGE, 2018).

Nesse novo ajustamento da rede vertical, além dos desníveis observados em campo foram utilizados valores observados e interpolados de gravidade nas RRNN. Isso permitiu a obtenção dos números geopotenciais, os quais, após ajustamento pelo método dos mínimos quadrados propiciaram o cálculo das altitudes normais para as RRNN (IBGE, 2018). A partir do número geopotencial é possível determinar diferentes tipos de altitudes com significado físico, o que permite a compatibilidade com diferentes sistemas de altitude. Porém, como a obtenção dos números geopotenciais

depende de dados de nivelamento, as altitudes normais ainda estão vinculadas ao DV estabelecido de forma clássica.

Nesta atualização, a RAAP se prepara para uma unificação com o Sistema Vertical de Referência Global (IHRG) além de atender os requisitos em termos de altitudes do Sistema Geodésico de Referência para as Américas (SIRGAS).

A modernização da RAAP demonstra avanços ao alcançar altitudes com significado físico, dessa forma, o estudo realizado no trecho que compreende parte de Pontal de Paraná contribuirá para a densificação da informação altimétrica numa região em expansão e carente de infraestrutura geodésica, proporcionando estações com nivelamento geométrico de alta precisão e valores da gravidade, assim como números geopotenciais.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Contribuir com a implantação de uma linha de nivelamento que visa densificar a rede vertical de referência no litoral do Paraná, baseada em números geopotenciais.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Realizar revisão do estado da arte da determinação de altitudes geodésicas com significado físico;
- b) Determinar valores de altitude com significado físico (altitudes normais) para um conjunto de RRNN implantadas no município de Pontal do Paraná;
- c) Contribuir com as atividades de monitoramento da região costeira e de desenvolvimento tecnológico na região;

1.3. JUSTIFICATIVA

O monitoramento das regiões costeiras é essencial em face das mudanças climáticas, e só é possível com a existência de uma infraestrutura geodésica consistente na área de trabalho. Essa infraestrutura consiste na implantação de um conjunto de pontos e na determinação das coordenadas destes pontos em relação a referenciais geodésicos globais e isso inclui a determinação de altitudes com significado físico. O estabelecimento de uma rede de referência permite também gerar o apoio necessário a outros tipos de levantamentos e de atividades na região de estudo tais como: apoio à construção/modernização das vias de acessos/estradas, apoio às atividades relacionadas com a retirada de areia e apoio às análises de alagamentos/inundações, por exemplo.

A região litorânea do estado do Paraná possui grande relevância socioeconômica e ambiental, apresentando grande variedade de fauna e flora. Possui uma linha de costa com extensão de 110km e é uma região de interesse portuária industrial (KRELLING; SOARES, 2004). O Porto de Paranaguá movimentava cerca de aproximadamente 57 milhões de toneladas de granéis sólidos, carga geral e líquidos por ano, gerando uma receita de US\$ 31 bilhões de dólares anuais dentre importação e exportação (PORTOS DO PARANÁ, 2021).

Pontal do Paraná, apresenta uma certa carência na densificação e manutenção de sua infraestrutura geodésica. Além das redes geodésicas implantadas pelo IBGE, também existem as redes estaduais e municipais, que muitas vezes não são disponibilizadas aos usuários e muitas vezes possuem informações incompletas, principalmente quando se trata da Rede Altimétrica. Isso mostra a necessidade de estruturas geodésicas básicas, para o apoio à organização cadastral, de infraestrutura urbana e controle de impactos em ambientes costeiros (DE VARGAS et al., 2020).

Nesse sentido o projeto Rede Geo, que envolve duas instituições federais do sul do país, a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), tem contribuído com a implantação e aquisição de dados geodésicos na região de Pontal do Paraná. O projeto, tem também finalidade facilitar o acesso aos dados por meio de um aplicativo para dispositivos móveis (Android e iOS) no qual, por meio de uma leitura de código (QR-code), é informado para o usuário as coordenadas, a localização e situação (status) dos marcos geodésicos. O link de acesso está disponível em <http://labsim.unipampa.edu.br/redegeoV1/index.php>.

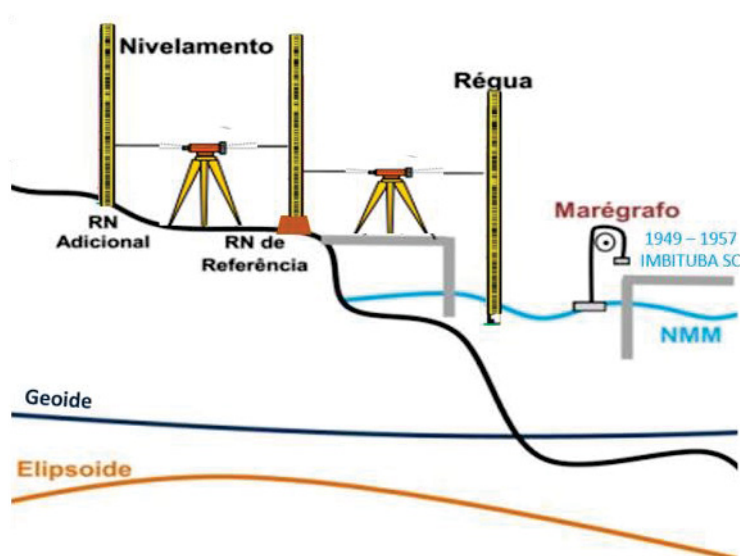
Desta forma, esse trabalho visa contribuir com o conhecimento de altitudes físicas no litoral do Paraná, tendo em vista a necessidade de seguir as normativas e padronizações do IBGE, para uma nova linha que visa densificar a rede geodésica de altitudes na região e incrementar as informações para o aplicativo desenvolvido.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. SISTEMAS DE ALTITUDES

Em um conceito clássico, os referenciais verticais eram definidos a partir de observações do nível do mar em estações maregráficas, coletadas em um dado período de tempo, e onde o NMM era considerado coincidente com o geóide no ponto origem (*Datum* Vertical). No Brasil, essas observações foram provenientes do marégrafo de Imbituba-SC (no período de 1949 a 1957) e de Santana-AP (no período de 1957 a 1958), estas duas estações maregráficas definiram os *Data* Verticais oficiais do país (LUZ, 2016). Com relação ao estabelecimento da rede de referência altimétrica, este era feito com nivelamento geométrico, onde as altitudes das RRNN eram estabelecidas como o somatório dos desníveis medidos a partir do DV (FIGURA 1).

FIGURA 1 - DATUM ALTIMÉTRICO CLÁSSICO E SUA OBTENÇÃO.



Fonte: Adaptado de DA SILVA; DE FREITAS (2019).

No entanto, na abordagem clássica as altitudes não levam em consideração que a gravidade no Pólo é maior que a gravidade no Equador, devido ao achatamento terrestre e o efeito centrífugo, implicando na variação do geopotencial, logo superfícies equipotenciais se aproximam com o crescimento da latitude. Soma-se a isso o fato de que a distribuição de massas na Terra não é homogênea. Esses fatores têm implicação direta no nivelamento geométrico, fazendo com que os desníveis observados em campo sejam dependentes da trajetória seguida.

Para resolver o problema do efeito do não paralelismo das superfícies equipotenciais, alguns países introduzem as chamadas correções normais ortométricas ou ortométricas normais, para correção em parte desse efeito.

Segundo Gemael (1999), o efeito do não paralelismo pode ser determinado utilizando como modelo a Terra normal, assim é considerado o potencial da Terra Normal nesta que varia apenas com a latitude e independe da longitude da região. A correção aproximada devido ao não paralelismo das superfícies equipotenciais pode ser dada por pela Equação 1:

$$C = 0,00001542 \times H\Delta\varphi \text{ sen } 2\varphi \quad (1)$$

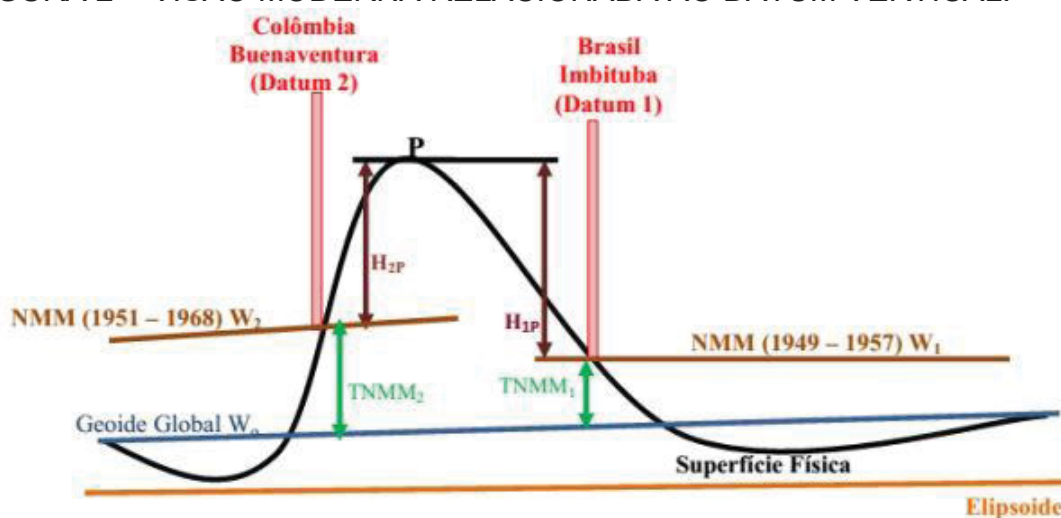
Onde: φ é a latitude aproximada da região;

$\Delta\varphi$ é a diferença de latitudes entre dois pontos da seção nivelada (em minutos de arco);

H é a altitude ortométrica do ponto.

Ainda assim, se for comparar as altitudes entre redes verticais de países vizinhos, por exemplo, as diferenças das altitudes no mesmo ponto nivelado, não podem ser explicadas apenas por erro de nivelamento, tornando a interligação das redes verticais incompatível. Na abordagem moderna apontada na Figura 2, além de estarem associadas ao nivelamento e ao referencial de nível de cada rede vertical e suas variações temporais e espaciais, a discrepância que existe entre o Nível Médio do Mar e o geoide global, chamado de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM), causada por efeitos como correntes marinhas e variação da pressão atmosférica, permite o relacionamento dos referenciais locais e o referencial global (DALAZOANA; DE FREITAS, 2020; SANTANA; DALAZOANA, 2020).

FIGURA 2 - VISÃO MODERNA RELACIONADA AO DATUM VERTICAL.



Fonte: Adaptada do IBGE, 2002 apud DALAZOANA; DE FREITAS, 2020.

Os aspectos clássicos relacionados com o DV e com a materialização da rede vertical não permitem o intercâmbio de dados entre diferentes países, pois geram diferenças nas altitudes niveladas para um mesmo ponto, conforme apresentado na Figura 2.

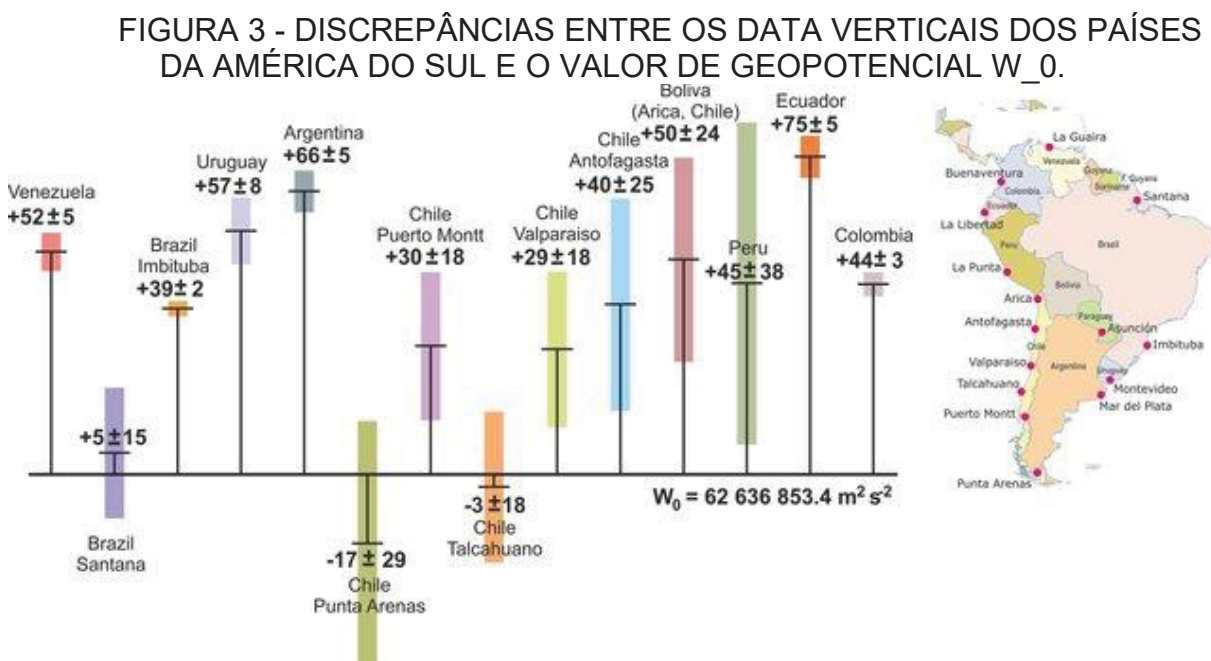
Colaboram para estas diferenças: a determinação do DV a partir do NMM em um ponto e numa dada época; o fato de alguns países possuírem mais de um DV devido à impossibilidade de densificação da rede vertical na totalidade do país devido à sua configuração geográfica; a não consideração de variações temporais tanto na definição do DV quanto no estabelecimento da rede; diferentes formas de estabelecimento da rede vertical que levaram em conta ou não correções gravimétricas; entre outros aspectos.

Assim, com a necessidade da integração de redes verticais de diferentes países, constatou-se que a materialização do DV a partir de observações pontuais do nível do mar materializa geoides distintos, dessa forma, cada materialização clássica pode ser considerada como um geóide local, pois não se considerava o desvio existente entre o NMM local e o geóide global, conhecido como Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) (Figura 2) (SANTANA, 2020).

A solução para essas questões vem com a definição de uma superfície de referência global e a definição de altitudes com significado físico e relacionadas com uma diferença de potencial da gravidade chamada de número geopotencial (C). Na

abordagem moderna, conforme resolução N° 1 de 2015 da IAG, o geoide é definido como uma superfície equipotencial global, com valor de geopotencial igual a W_0 , com $W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, esta superfície é considerada como *Datum* Vertical global unificado, base para a futura integração ao IHRF.

Na Figura 3, podem ser vistas as discrepâncias em centímetros entre os DV locais na América do Sul e a superfície equipotencial global W_0 . Conforme indicado anteriormente, estas discrepâncias ocorrem pelo fato de existirem diferentes *Data* verticais, diferentes formas de estabelecimento da rede vertical, enfim por não haver uma padronização entre eles. Os resultados apresentados na Figura 3, indicam uma discrepância de ~ 39 cm entre o DV de Imbituba e a superfície de referência global.



Fonte: Sánchez e Sideris, 2017.

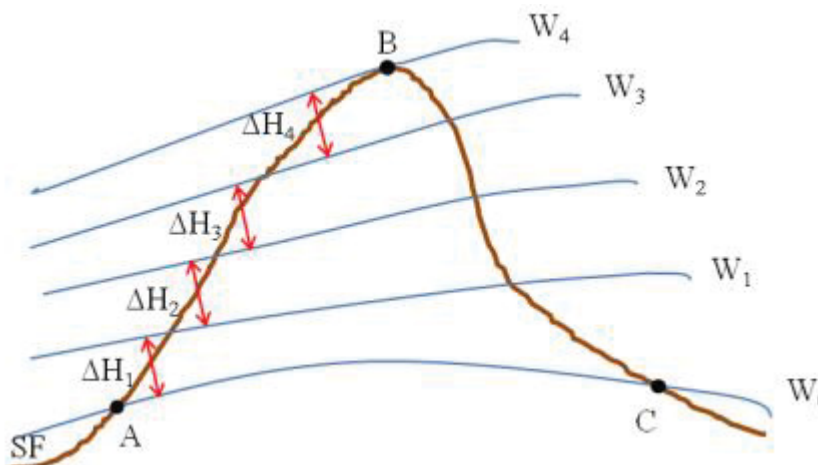
2.1.1. Número geopotencial

Atualmente, segundo a IAG a definição de altitude a partir do número geopotencial é preceito básico para a definição do IHRS e para a materialização da rede a ele associada – o IHRF (IHDE et al., 2017). Este valor é encontrado com o cálculo da diferença de potencial da gravidade entre a superfície equipotencial de referência e a superfície equipotencial local, na prática o número geopotencial é obtido

em função da aceleração da gravidade associada ao nivelamento geométrico de alta precisão, conforme detalhado na sequência.

No nivelamento geométrico, por mais rigoroso que seja o processo de medição, ainda existirá uma diferença no fechamento de seções, linhas ou circuitos, devido ao fato de que as superfícies equipotenciais não são paralelas entre si (DE FREITAS; BLITZKOW, 1999). O número geopotencial é uma solução possível para a obtenção das altitudes físicas, já que, esta grandeza é unívoca e tem significado físico, é independente do trajeto entre um ponto origem e um ponto qualquer (IBGE, 2019). Na Figura 4, a altitude de B está relacionada com a diferença de potencial ($W_0 - W_4$).

FIGURA 4 - ALTITUDE COMO FUNÇÃO DE UMA DIFERENÇA DE POTENCIAL DA GRAVIDADE.



Fonte: DALAZOANA; DE FREITAS, 2020.

O número geopotencial (C_p) é a diferença entre o potencial da gravidade na superfície de referência (W_0) e o potencial da gravidade no ponto considerado (W_p) (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005):

$$C_p = W_0 - W_p = \int_0^p g dH \quad (2)$$

A integral expressa na Equação (2) pode ser substituída por um somatório dos desníveis medidos multiplicados pelo valor médio da gravidade na seção de nivelamento:

$$C_p = \sum \Delta H_i g_{médio_i} \quad (3)$$

Onde:

ΔH_i : desníveis medidos numa seção de nivelamento;

$g_{médio_i}$: valor médio da gravidade na seção de nivelamento.

Na prática, é realizado cálculo das diferenças do número geopotencial entre dois pontos, A e B por exemplo (ΔC_{AB}), desde que a distância entre os pontos A e B seja suficientemente pequena (IBGE, 2018):

$$\Delta C_{AB} = C_B - C_A = (W_B - W_A) \approx g_{AB} \Delta H_{AB} \quad (4)$$

No entanto, a utilização direta do número geopotencial como coordenada vertical de pontos é um problema devido a sua unidade ser expressa em kilogal.metro ou m^2/s^2 , logo, o número geopotencial deve ser convertido em altitudes físicas, expressas em metros e assim de mais fácil entendimento para o usuário. Para isso, a integral apresentada na Equação (2) pode ser resolvida:

$$C_P = \int_0^P g \, dH \quad (5)$$

$$C_P = g_{médio} \int_0^P dH \quad (6)$$

$$C_P = g_{médio} \cdot H_P \quad (7)$$

Assim, devido à dificuldade da unidade do número geopotencial ser expressa em m^2/s^2 , o problema citado é resolvido quando se faz a divisão de C por um valor de gravidade (G). Dependendo do valor de gravidade adotado tem-se diferentes tipos de altitudes físicas, expressas em metros, equação 8 (IBGE, 2019):

$$H_P^{física} = \frac{C_P}{G} \quad (8)$$

Com o reajustamento da rede altimétrica em julho de 2018, as altitudes normais-ortométricas utilizadas até então, foram substituídas por altitudes do tipo normal, as quais são baseadas em números geopotenciais (IBGE, 2018). Na sequência serão apresentados alguns exemplos de altitudes com significado físico.

2.1.2. Tipos de altitudes: Ortométrica, Dinâmica e Normal

2.1.2.1. Altitude Dinâmica

A altitude dinâmica (H_D), é dada pela divisão do número geopotencial (C_P) pelo valor da gravidade normal (γ_0) para uma dada latitude.

$$H_D = \frac{C_P}{\gamma_0} \quad (9)$$

Usualmente essa latitude é considerada como sendo igual a 45°, a gravidade normal é determinada com base nos parâmetros do elipsoide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*), a partir de fórmulas clássicas, como o Teorema de Clairaut ou a fórmula de Somigliana (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005 p.160).

$$\gamma_{45^\circ} = 980.619.920,3 \mu Gal \quad (10)$$

A altitude dinâmica, possui características estritamente físicas e é a única altitude que apresenta valores constantes sobre uma mesma superfície equipotencial. Às vezes é conveniente converter os valores de desníveis medidos em diferenças de altitudes dinâmicas acrescentando a correção dinâmica (DC_{AB}) dada pela Equação (11) aos desníveis observados (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005):

$$DC_{AB} = \int_A^B \frac{g-\gamma_0}{\gamma_0} dn = \sum_A^B \frac{g-\gamma_0}{\gamma_0} \delta n \quad (11)$$

Onde, A e B são as RRNN, γ_0 é a gravidade normal, g é valor da gravidade e δn o desnível bruto medido entre os pontos A e B.

2.1.2.2. Altitude Ortométrica

Diferentemente da altitude dinâmica, a altitude ortométrica possui significado físico e geométrico. É definida pela distância entre a superfície do geoide e o ponto

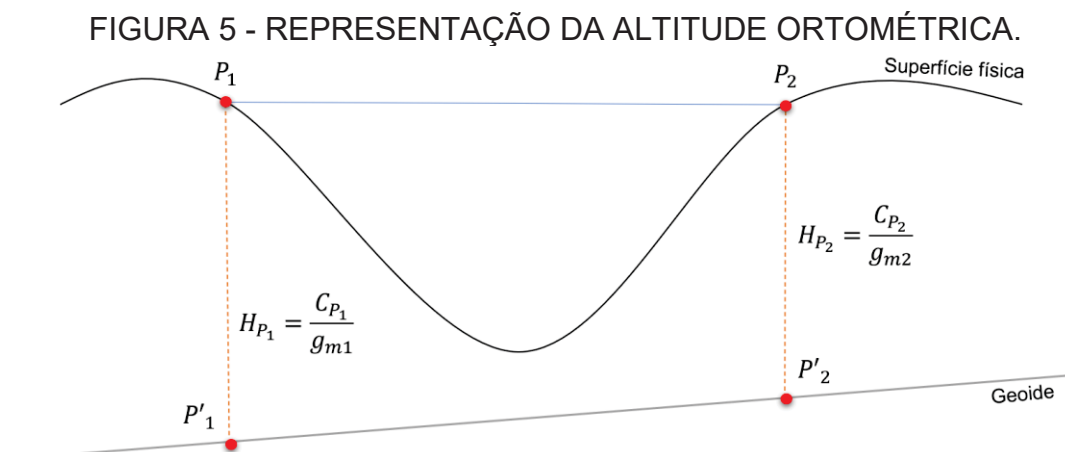
de interesse na superfície física da Terra, ao longo da vertical. A altitude ortométrica de um ponto é obtida por (IBGE, 2018):

$$H = \frac{C_P}{\bar{g}} \quad (12)$$

Onde \bar{g} é valor médio da gravidade entre P (ponto sobre a superfície física da Terra) e P' (projeção de P sobre o geóide segundo a vertical), e é determinado por:

$$\bar{g} = \frac{1}{H} \int_0^H g \partial H \quad (13)$$

Uma questão relacionada a altitude ortométrica é a de que pontos sobre a mesma superfície equipotencial tem altitudes diferentes. Como pode ser visto na Figura 5, considerando que os pontos P_1 e P_2 , estão na mesma equipotencial os números geopotenciais são iguais ($C_{P_1} = C_{P_2}$), porém os valores da gravidade são diferentes em ambos os pontos ($g_{m_1} \neq g_{m_2}$), então $H_{P_1} \neq H_{P_2}$ embora P_1 e P_2 estejam na mesma superfície equipotencial.



FONTE: O autor, 2021.

Como o valor de \bar{g} deve ser conhecido, porém não é possível observar valores de gravidade entre o geóide e a superfície física, uma aproximação de \bar{g} é determinada por meio de reduções, como a redução de Bouguer por exemplo,

considerando alguma simplificação acerca da distribuição de massas no interior do planeta (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005).

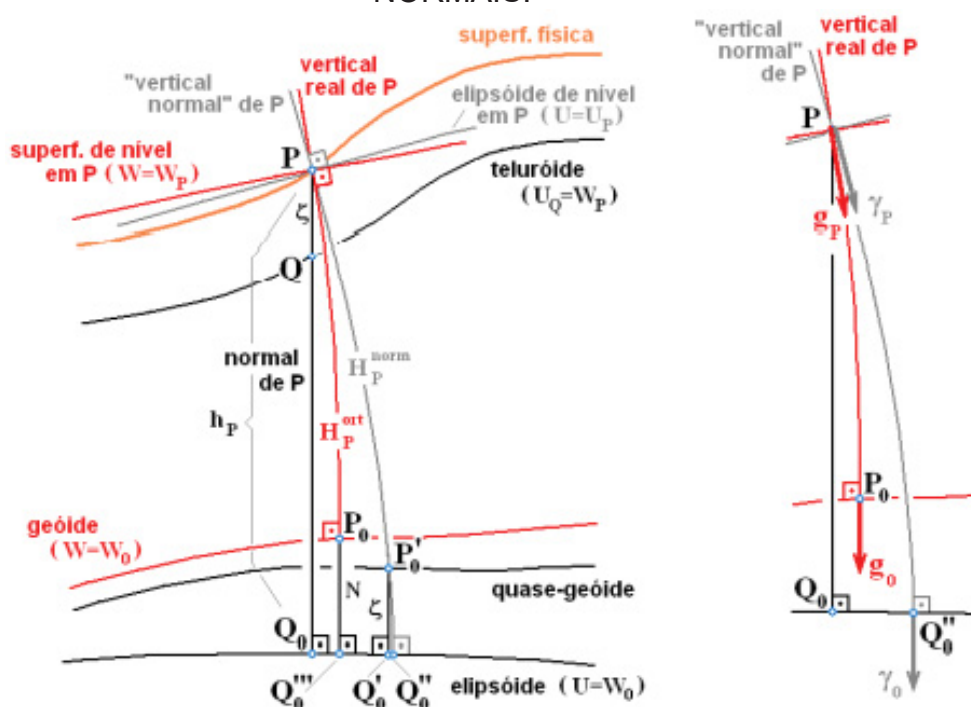
De forma prática a altitude ortométrica (H) possui relação com a altitude elipsoidal (h) por meio da altitude geoidal (N) e. Estas grandezas se associam pela expressão:

$$H \cong h - N \quad (14)$$

2.1.2.3. Altitude Normal

A altitude normal é medida ao longo da vertical normal entre a superfície física e o quase geóide, ou então, é dada pela separação entre o elipsóide e a superfície teluroidal, conforme ilustra a Figura 6.

FIGURA 6 - ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA DEFINIÇÃO DAS ALTITUDES NORMAIS.



Fonte: IBGE, 2017b.

A altitude normal em um ponto é calculada pela divisão do número geopotencial (C_P) por um valor médio de gravidade normal ($\bar{\gamma}$) ou gravidade teórica dado pelo modelo Terra normal:

$$H_N = \frac{C_P}{\bar{\gamma}} \quad (15)$$

O valor $\bar{\gamma}$ é obtido pela seguinte equação (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005; IBGE, 2018):

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 \left[1 - \frac{H_N}{a} (1 + \alpha + m - 2\alpha \sin^2 \varphi) + \left(\frac{H_N}{a} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Onde, a, m, α e γ_0 são parâmetros vinculados ao Sistema Geodésico de Referência (SGR) adotado, a é o valor do semieixo maior, $m = \omega^2 a^2 b / GM$, sendo GM a constante gravitacional geocêntrica, ω é a velocidade angular e b é o semieixo menor do elipsoide de referência, φ é a latitude geodésica do ponto de interesse e H_N é a altitude normal. A obtenção de $\bar{\gamma}$ é feita por iterações, uma vez que é dependente de H_N , geralmente são suficientes de três a cinco iterações, considerando como valor de entrada $H_N \approx H_{NIVELADA}$.

A altitude normal se relaciona com a altitude elipsoidal por meio da anomalia de altura (ζ), esta pode ser extraída de um modelo quase-geoidal (IBGE, 2018):

$$H_N = h - \zeta \quad (17)$$

Onde H_N é a altitude normal, h é a altitude elipsoidal e ζ é a anomalia de altura.

2.2. REDE VERTICAL DE REFERÊNCIA DO BRASIL

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), ou Rede Vertical de Referência do Brasil (RVRB), é constituída por um conjunto de marcos geodésicos, denominados de RRNN, onde suas altitudes de alta precisão são resultantes do nivelamento geométrico duplo (nivelamento e contra-nivelamento), pelo método das visadas iguais, com instrumentos e procedimentos específicos para alcançar a alta precisão da RAAP. Realiza-se o nivelamento linear composto, ou seja, são realizados lances, que compõem as seções e linhas. Sendo que a sequência das medições deve formar circuitos fechados visando o controle da propagação dos erros (IBGE, 2017).

Em 2018, uma nova realização da RVRB é exercida, buscando uma integração física, adicionou-se informações gravimétricas sobre as linhas de nivelamento. Objetivando a modernização da RVRB, as altitudes normais foram calculadas a partir do ajustamento baseado em números geopotenciais. Porém, como os números geopotenciais são obtidos na prática pela associação de nivelamento geométrico com gravimetria, as altitudes normais ainda possuem vínculo com os dois *Data Verticais* do Brasil. O processo da modernização procura, no futuro, alcançar a conexão dos segmentos da rede e o referenciamento global ao IHRs (JESUS; DE FREITAS, 2020).

Posteriormente a publicação das altitudes normais, o IBGE disponibilizou aos usuários um modelo de conversão de altitudes elipsoidais em altitudes normais: o hgeoHNOR2020 (IBGE, 2021). Com o modelo hgeoHNOR2020 o IBGE busca uma melhoria na qualidade da conversão das altitudes elipsoidais em altitudes físicas, uma vez que o modelo propicia uma conversão com maior consistência em relação ao referencial vertical, materializado pelas novas altitudes normais das RRNN, resultantes do Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais - REALT 2018.

A Figura 7, mostra em vermelho a rede altimétrica brasileira, sendo possível verificar a densificação das RRNN no país.

FIGURA 7 - REDE ALTIMÉTRICA DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO.



Fonte: Base de dados do IBGE, 2022.

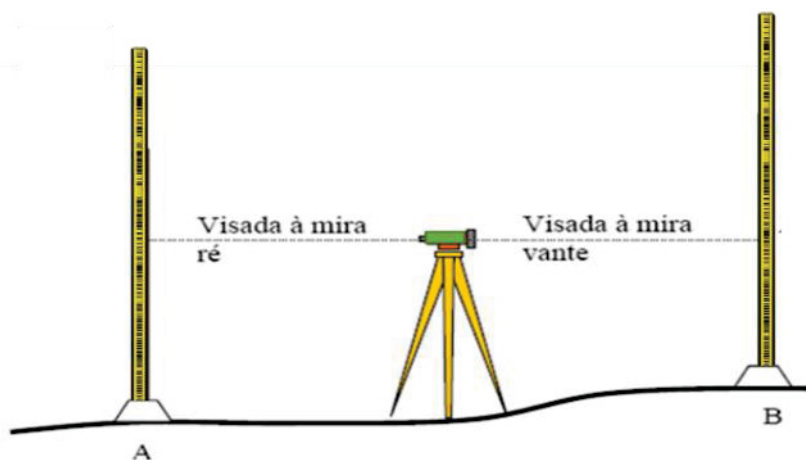
2.3. NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

Para o nivelamento geométrico de alta precisão, são utilizadas as especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos do IBGE: a Resolução PR n° 22 de 21 de julho de 1983 e as Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (IBGE,

2017b). Com relação aos levantamentos altimétricos esta última trata das especificações para o chamado nivelamento geométrico de alta precisão, que tem a finalidade de densificação da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), e para o nivelamento científico que é aplicado para o controle geodésico e a vinculação entre as Estações Maregráficas.

As especificações destes documentos referem-se às normas gerais para levantamentos geodésicos, gravimétricos, planimétricos e altimétricos, que visam regular a execução destes levantamentos, estabelecendo as tolerâncias e critérios para serem seguidos na condução dos levantamentos. Considerando a operação do nivelamento geométrico de alta precisão, os levantamentos altimétricos envolvem a medição do desnível entre RRNN sucessivas, pelo método das visadas iguais (FIGURA 8).

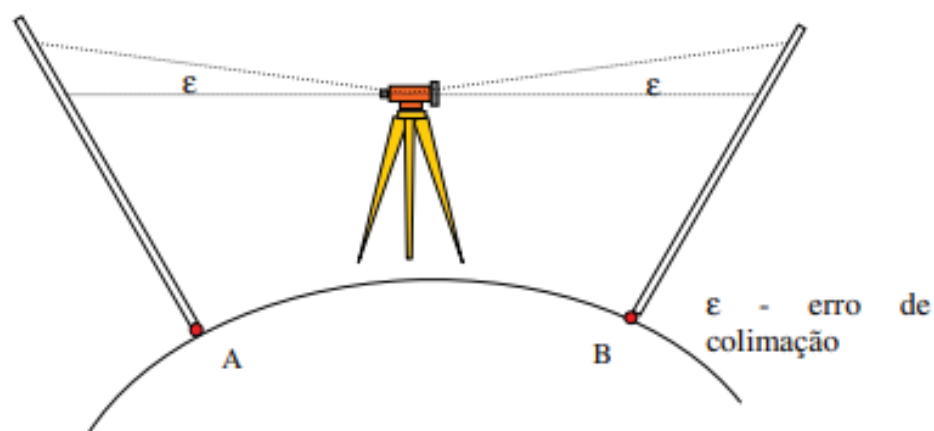
FIGURA 8 - MÉTODO DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO COM VISADAS IGUAIS.



FONTE: Adaptado de Veiga et al, 2012.

Nesse caso, a ocorrência de erros sistemáticos é comum em operações de nivelamento, por isso usualmente são empregadas visadas com distâncias aproximadamente iguais de até 60 m de comprimento (FIGURA 8), para minimizar o erro de curvatura da Terra, da refração atmosférica e o erro de colimação vertical do nível (FIGURA 9).

FIGURA 9 - ERRO DE COLIMAÇÃO E CURVATURA TERRESTRE.



FONTE: Veiga et. Al, 2012.

Além do mais, para evitar os efeitos de reverberação causada pelo calor, as leituras das miras devem ser medidas acima dos 50cm. Sendo que para terrenos acidentados as leituras podem ser acima de 20cm, neste caso, o comprimento das visadas deve ser inferior a 10m (IBGE, 2017b).

2,3.1. Nivelamento Geométrico de Alta Precisão

Para o nivelamento geométrico de alta precisão e também para o nivelamento científico, as miras são utilizadas em pares, iniciando em cada lance a leitura pela mira mestra, de modo que a mira posicionada inicialmente no ponto de partida - primeira ré do levantamento, seja a mira posicionada no ponto final - última vante (FIGURA 10), a fim de eliminar o erro de índice. Estas miras, por sua vez, devem sempre ser posicionadas sobre sapatas e nunca diretamente sobre o solo. A diferença dos dois métodos está na sua finalidade, o nivelamento geométrico de alta precisão é utilizado para a densificação da RAAP e o nivelamento científico para controle geodésico e vinculação entre as Estações Maregráficas que tem maior controle de qualidade, a geometria da rede tem circuitos e comprimentos de sessões e de visadas menores (IBGE, 2017b).

A qualidade do nivelamento é controlada por meio da diferença entre o nivelamento e o contranivelamento, seção a seção e acumulada na linha. Para o controle da qualidade do fechamento das seções de nivelamento de alta precisão, o

IBGE utiliza o valor de $3\text{mm}\sqrt{km}$, com o objetivo da Densificação da Rede Altimétrica (IBGE, 2017b).

FIGURA 10 - LANCE DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.



Fonte: Adaptado de Silva (2012).

Sabendo-se a altitude do ponto de partida (HA), é possível conhecer a altitude do ponto de vante (HB) através da equação 18:

$$HB = HA + \Delta h_{AB} \quad (18)$$

O erro cometido (ε_C) pode ser calculado pela diferença do valor absoluto entre os desníveis encontrados no nivelamento e no contra nivelamento:

$$\varepsilon_C = |\Delta H_{\text{Nivelamento}}| - |\Delta H_{\text{Contra-nivelamento}}| \quad (19)$$

O erro permitido (ε_P) é calculado através da multiplicação:

$$\varepsilon_P = 3\text{mm}\sqrt{k} \quad (20)$$

Sendo k medido em quilômetros:

$$k = \frac{\text{Distância}_{\text{Nivelamento}} + \text{Distância}_{\text{Contra-Nivelamento}}}{2} \quad (21)$$

Analisando a diferença entre o erro cometido e o erro permitido é possível analisar se o nivelamento é aceito, ou se é necessário voltar a campo.

2.3.2 Rede geodésica de referência costeira

O Brasil possui uma linha costeira superior a 8.500km de extensão. Uma extensa e variada faixa litorânea, considerada uma das maiores do mundo. Abrange uma grande diversidade de paisagens e um ecossistema variado em poucos quilômetros de distância, devido basicamente às diferenças climáticas e geológicas do país (BRASIL, 2021).

Em discussões que envolvem mudanças globais, um dos assuntos mais discutidos é a elevação do nível do mar, pois este, tem impacto direto na ocupação da população em áreas costeiras (DA SILVA et al., 2016). Em uma área de grande importância para o Brasil, a zona costeira apresenta grande dinâmica e vulnerabilidade a fenômenos naturais e mudanças climáticas, como exemplo pode-se citar as cidades litorâneas de Joinville e Itajaí, Estado de Santa Catarina apresentado no trabalho de Braum et al. (2017).

Outra consequência vem ser a tendência de aumento da ocorrência de tempestades costeiras causando deslizamentos e enxurradas, riscos de inundações costeiras e erosão, colocando em risco moradias e infraestruturas como, portos, rodovias, escolas, hospitais, entre outros, além da perda de ambientes como mangues, dunas e praias. Neste sentido, as cidades localizadas em zonas costeiras necessitam de investimentos para a redução de riscos e a minimização desses impactos para eventuais casos futuros ocasionados por mudanças climáticas (PBMC, 2016).

A implantação da rede de estações maregráficas ao longo da costa brasileira foi realizada a partir de 1949 pelo *Inter-American Geodetic Survey* (IAGS). Em 1959, foi então definido e adotado o *Datum* de Imbituba, através da média dos níveis médios do mar anuais, entre 1949 e 1957, no Porto de Imbituba. As médias mensais e anuais da rede maregráfica do IAGS encontram-se armazenadas no *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL), sendo que para Imbituba as observações disponíveis

referem-se ao período de 1949 a 1969. Segundo Dalazoana (2006) resultados baseados em dados maregráficos e de nivelamento, mostram uma elevação no NMM no Porto de Imbituba em torno de 2 mm/ano. Estes resultados foram obtidos com a integração das séries temporais armazenadas no banco de dados do PSMSL e dados digitais de 2001 a 2004 derivados da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) do IBGE.

A RMPG foi lançada em 1997 com o objetivo de realizar a transição para o DV do SIRGAS e correlacionar o DV de Imbituba com outros referenciais altimétricos existentes no litoral brasileiro (IBGE, 2016). As primeiras estações foram implantadas em 2001 e em 2008 a sua capacidade operacional foi alcançada com as estações de Santana, Fortaleza, Salvador, Macaé e Imbituba que operavam então com sensores maregráficos eletrônicos e convencionais (IBGE, 2010). Hoje, são seis estações maregráficas ativas (Imbituba, Salvador, Santana, Fortaleza, Arraial do Cabo e Belém) e uma inativa (Macaé) desde junho de 2015 (IBGE, 2016).

No sentido de contribuir para prevenir e contornar os problemas associados aos impactos das mudanças globais em zonas costeiras, o IBGE vem desenvolvendo um projeto que estabelece uma Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) constituída por marcos geodésicos mais robustos, sobre os quais se realiza nivelamento geométrico segundo as normas para levantamento altimétrico científico, implantação de uma malha gravimétrica densa, e implantação de estações GNSS e estações maregráficas. Este projeto trata como necessário a compatibilização dos níveis de referência utilizados na mensuração das altitudes e das profundidades, para a integração das referências altimétricas tanto terrestre quanto marítima (SOARES; SANTOS; LUZ, 2019).

2.4. GRAVIMETRIA

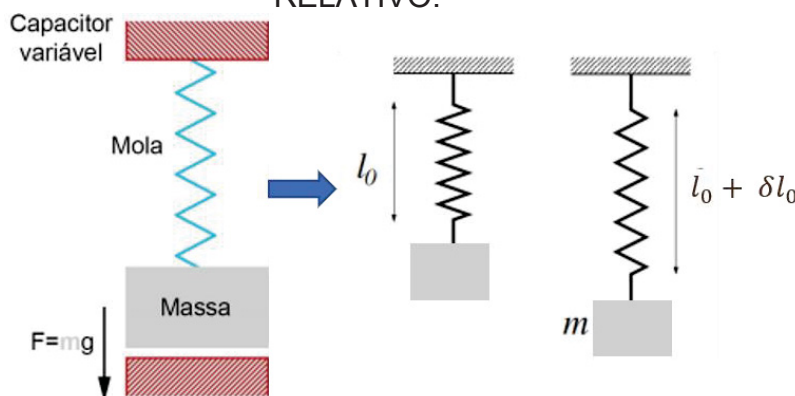
A Gravimetria proporciona o valor de g (módulo do vetor gravidade) na superfície física da Terra ou em seu exterior. Levando em conta as variações de densidade e a distribuição de massas no planeta, o método gravimétrico possibilita a determinação da variação da aceleração da gravidade sobre a superfície física terrestre.

Os equipamentos utilizados em levantamentos gravimétricos, são instrumentos de alta sensibilidade e precisão, uma vez que as variações do campo da gravidade detectadas são pequenas. Usualmente o valor da gravidade em um ponto é obtido por meio de equipamentos denominados de gravímetros.

A determinação do valor de g poder ser feita por medições absolutas quando se obtém o valor da gravidade diretamente sobre o ponto onde está instalado o gravímetro ou por medições relativas quando se obtém diferenças de gravidade entre dois pontos. Como no método relativo são determinadas as diferenças de gravidade entre duas estações, logo, um ponto com gravidade conhecida deve ser tomado como referência para transportar este valor de g até o ponto de interesse.

O princípio básico dos gravímetros relativos baseia-se na medição da variação da posição de uma massa de teste, através da relação de equilíbrio entre a força da gravidade e uma força antagônica, geralmente de natureza elástica ou magnética (GEMAEL, 1999). Desta forma, para o caso de uma massa teste suspensa por uma mola, quando a massa teste sofre atração gravitacional a mola é tensionada, sofrendo uma deformação (δl_0) (FIGURA 11).

FIGURA 11 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GRAVIMETRO RELATIVO.

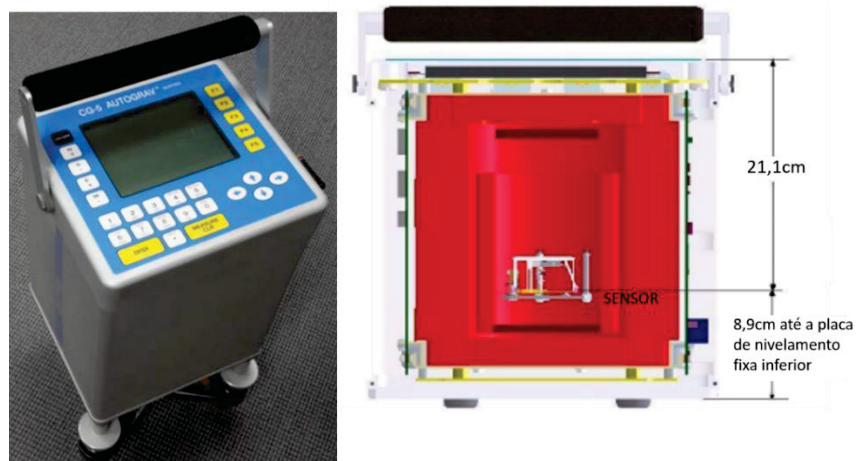


Fonte: Adaptado de LENZ, 2020.

O desenvolvimento dos gravímetros digitais (FIGURA 12) proporcionou grande facilidade operacional, pois as leituras são realizadas automaticamente após o equipamento estar nivelado sobre o ponto de interesse. A quantidade de amostras na aquisição de valores da gravidade é definida pelo operador, sendo que a leitura final é o valor médio da gravidade calculado em função das amostras acompanhado da respectiva incerteza. 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, e inclinações nos eixos X e Y do plano principal (horizontal) do gravímetro.

FIGURA 12 - GRAVIMETRO DIGITAL CG-5.



Fonte: Adaptado de SCINTREX, 2012.

A correção devido à maré terrestre é a primeira correção que deve ser aplicada aos dados gravimétricos coletados em campo. Além disso, os gravímetros sofrem variações em suas condições elásticas resultando em leituras distintas para um mesmo ponto em diferentes instantes. Para tornar os resultados do levantamento homogêneos, as condições ideais de operação precisam sempre ser verificadas. Em relação às condições elásticas, a leitura do gravímetro tende a variar com o tempo mesmo que a aceleração não varie, ou seja, que o aparelho seja mantido no ponto. Esta variação é denominada de deriva instrumental. A deriva instrumental tem um comportamento diferente se o aparelho estiver em repouso (deriva estática) ou se estiver em movimento (deriva dinâmica) e elas precisam ser controladas de forma específica.

2.4.1. Correção de Maré Terrestre

A superfície física da Terra não se apresenta de maneira estacionária e, isso ocorre porque a interação gravitacional entre a Terra, Lua e Sol resulta em esforços diferenciais significativos que produzem deformações em cada uma das partes do corpo planetário (DE FREITAS; MANTOVANI, 1993). Este efeito provoca o fenômeno de marés, que no caso oceânico induz uma oscilação vertical na superfície do mar ou

em qualquer outra grande massa d'água na superfície da Terra. No caso da Terra sólida, o fenômeno das marés acarreta deformações da superfície, alterações no módulo e direção do vetor gravidade e alterações no geopotencial (SANTANA, 2020).

A gravidade na Terra é afetada pela componente radial da aceleração de maré, que é positiva na direção externa causando um decréscimo no valor da gravidade terrestre. Os efeitos das marés podem causar variações de até 0,3 mGal, por ser um fenômeno cíclico e previsível, existem vários programas que, a partir das coordenadas do ponto, da data e hora da medição, produzem valores para esta correção através de curvas teóricas baseadas em observações de marés terrestres durante certo período de tempo ou utilizando modelos matemáticos (LONGMAN, 1959), a maioria dos equipamentos atuais faz essa correção automaticamente.

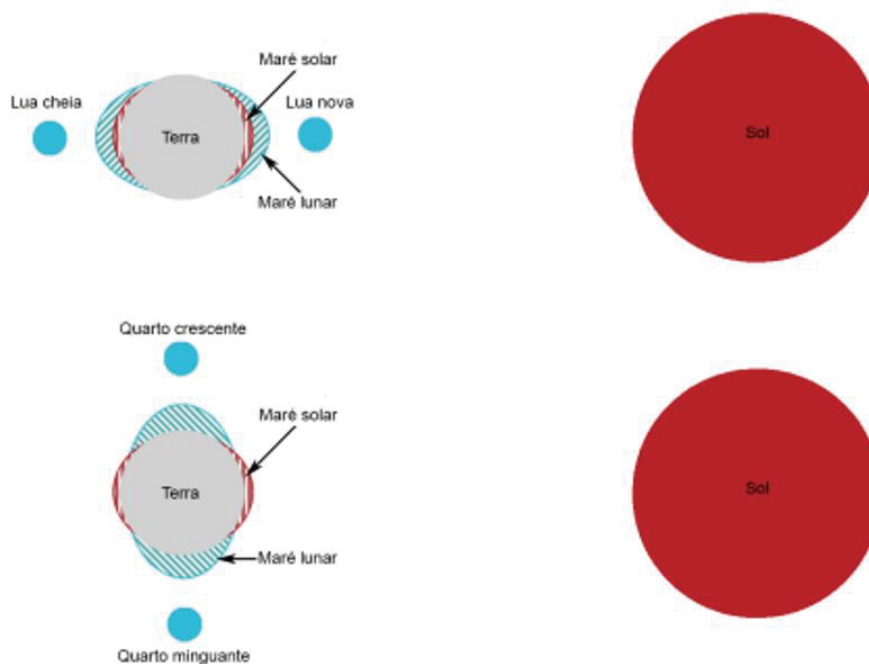
A consideração do efeito da maré é válida tanto para o Sol quanto para a Lua, os demais corpos celestes menores não são considerados. Sendo que, o efeito do Sol é de 38% do efeito da Lua, pois mesmo o Sol tendo uma massa maior que a Lua, esta se encontra mais próxima da Terra (COSTA, 2017).

Esta interação entre a Terra, o Sol e a Lua gera deformações no corpo planetário e variações no geopotencial. Essas deformações podem chegar a 15cm na horizontal e até 50cm segundo a direção vertical, o que implica na redistribuição de massas no planeta. Esta deformação da crosta afeta o posicionamento tridimensional.

Além disso, a atração luni-solar como é conhecida, perturba o valor da gravidade em módulo e direção, a primeira perturbação afeta as medidas da gravidade e a segunda o desvio da vertical, com repercussão no nivelamento geométrico. Porém, como já indicado anteriormente, os gravímetros modernos já incorporam rotinas para a eliminação deste efeito sobre as medidas realizadas, sendo corrigidas automaticamente pelo equipamento.

Define-se como força de maré em um ponto, à diferença entre a força de atração exercida pelo Sol e pela Lua sobre a unidade de massa no ponto e no centro do modelo. A Figura 13 ilustra a força de maré para um modelo esférico de Terra:

FIGURA 13 - ATRAÇÃO LUNI-SOLAR, CONFORME O POSICIONAMENTO SOL A LUA E A TERRA.



Fonte: Lenz, 2020.

2.4.2. Correção de deriva estática e dinâmica

A deriva estática (D_E) ocorre enquanto o equipamento está em repouso, com duração maior que uma hora. É causada geralmente por fatores como grandes oscilações de temperatura e pressão. É dada por (IBGE, 2017b):

$$D_E = (L_{m+1} - L_m) \quad (22)$$

Onde: D_E é a deriva estática decorrente da interrupção no levantamento, L_m é a leitura média em mGal corrigida da perturbação luni-solar realizada na estação no início do período de repouso, e L_{m+1} é a leitura média em mGal corrigida da perturbação luni-solar no final do período de repouso. Quando o equipamento fica em repouso mais de uma vez, ou seja, quando existe mais interrupções no levantamento, a correção final será o somatório das interrupções anteriores com a vigente (IBGE, 2017b):

$$D_{E_i} = \sum_{i=1}^n (L_{m+1} - L_m) \quad (23)$$

Onde: D_{E_i} é a deriva estática decorrente da i -ésima interrupção e n é o número de interrupções ou de paradas. Cabe salientar, que se houver uma parada de 2 horas ou mais, a correção da deriva estática deve ser feita nas leituras posteriores, caso existir uma nova parada as correções da deriva estática devem ser feitas nas estações posteriores a esta parada e assim sucessivamente.

A deriva dinâmica, corresponde à variação ocorrida no período em que o gravímetro permaneceu em movimento, que equivale ao tempo decorrido entre a primeira e a última leitura do circuito, sobre o tempo de duração da deriva dinâmica, sendo:

$$D_d = \frac{L_1 - L_f}{t_d} \quad (24)$$

Onde:

L_1 é a primeira leitura;

L_f é a última leitura, ambas corrigidas da perturbação da maré e da deriva estática, e;

t_d é o tempo de duração da deriva dinâmica.

Para o cálculo dos valores de gravidade é considerado que um circuito de gravimetria relativa fornece as diferenças dos valores da gravidade entre estações de medição gravimétrica, o chamado desnível gravimétrico. O que significa que um circuito gravimétrico deve estar ligado a uma estação gravimétrica de referência, onde o valor da gravidade deve ser conhecido.

O cálculo inicia-se pela determinação dos desníveis gravimétricos (ΔG) entre cada estação do circuito e a estação de referência, em valores de mGal. Cada desnível é calculado pela diferença entre a leitura corrigida (L_I) de cada estação e a leitura corrigida (L_R) da estação de referência:

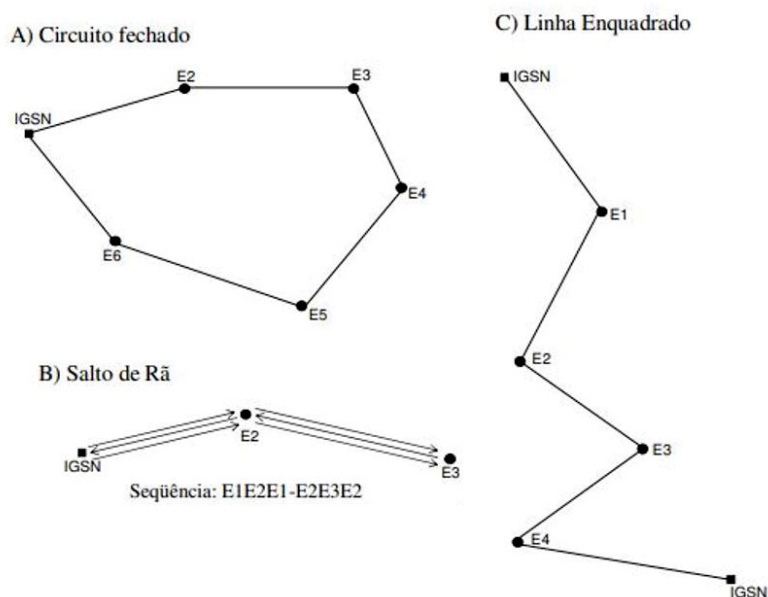
$$\Delta G = L_I - L_R \quad (25)$$

Calculados os desníveis gravimétricos entre a estação de referência e cada uma das estações que compõem o circuito, determina-se o valor de gravidade (g_i) de cada estação através da adição do valor (g_R) conhecido da estação de referência com o desnível gravimétrico de cada estação (ΔG_i):

$$g_i = g_R + \Delta G_i \quad (26)$$

Os circuitos gravimétricos são divididos em circuito gravimétrico fechado, enquadrado e salto de rã, conforme a Figura 14.

FIGURA 14 - CIRCUITOS GRAVIMÉTRICOS.



Fonte: Adaptado de GEMAEL, 1999.

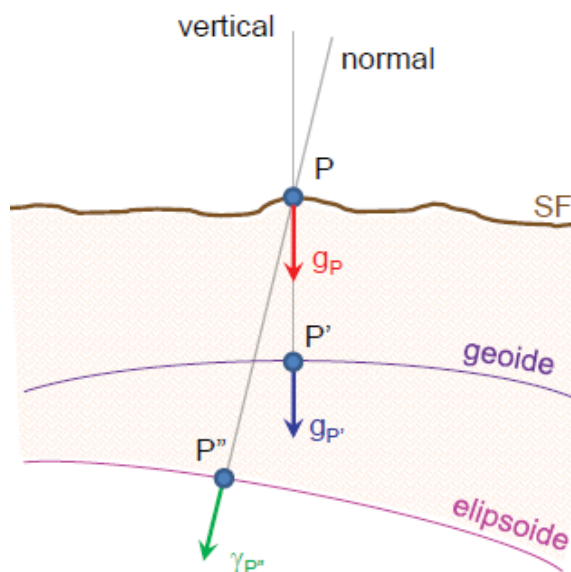
Nos circuitos apresentados na Figura 14, a estação IGSN (*International Gravity Standardization Net*) caracteriza uma estação de referência com gravidade conhecida, sempre o levantamento gravimétrico relativo é iniciado e finalizado numa estação de referência.

2.4.3. Anomalia De Bouguer

Um dos propósitos da determinação da gravidade é a obtenção das anomalias da gravidade que requerem o conhecimento do valor da gravidade sobre a superfície geoidal. A anomalia da gravidade num ponto P (Δ_g) é definida como a diferença entre a gravidade real sobre a superfície do geóide ($g_{P'}$) e a gravidade teórica calculada sobre a superfície do elipsoide de referência ($\gamma_{P''}$) (HOFMANN-WELLENHOF & MORITZ, 2005) (Figura 15).

$$\Delta_g = g_{P'} - \gamma_{P''} \quad (27)$$

FIGURA 15 - ANOMALIA DA GRAVIDADE.



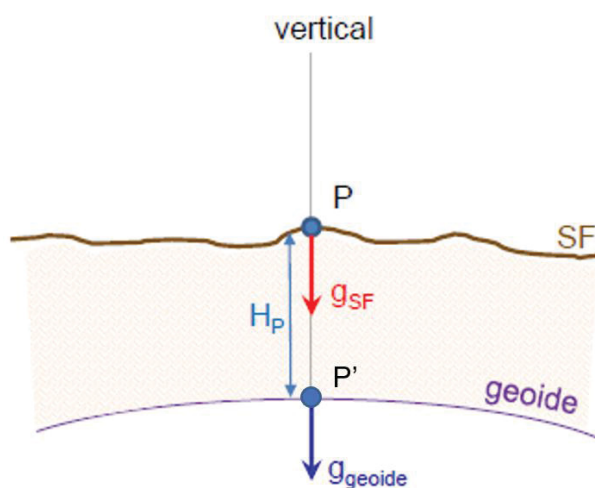
FONTE: O autor, 2021.

Como o valor da gravidade não pode ser medido na superfície equipotencial denominada geóide, a obtenção do valor da gravidade nesses pontos é realizada através de reduções gravimétricas. Em linhas gerais, pode-se dizer que as reduções gravimétricas são aplicadas com três principais propósitos: determinação do geóide; interpolação de valores da gravidade; e em estudos de investigação da crosta terrestre.

O campo de gravidade sofre influência da heterogeneidade da densidade e da distribuição de massas no planeta. As reduções gravimétricas buscam eliminar a

influência da distribuição de massas existente entre o geóide e a superfície física da Terra, com isso é possível reduzir o valor da gravidade observado sobre a superfície (g_P) até o geóide ($g_{P'}$) (FIGURA 16).

FIGURA 16 - REDUÇÃO GRAVIMÉTRICA.



Fonte: O autor, 2021.

É importante ressaltar que o cálculo da redução gravimétrica deve considerar a remoção do efeito das massas acima do geóide e a estação gravimétrica deve ser levada de P para P' (FIGURA 16) (GEMAEL, 1999). Como a redução deve considerar o material que preenche a crosta entre o ponto P e o ponto P', diferentes considerações podem ser feitas, gerando assim diferentes tipos de redução gravimétrica e como consequência diferentes tipos de anomalia da gravidade.

A redução de Bouguer por exemplo remove o efeito gravitacional das rochas existentes entre o ponto de observação e o nível de referência (GAGG, 2014). Assim, o objetivo da redução de Bouguer é a remoção completa do efeito das massas topográficas sobre o geóide, o cálculo desse efeito é aplicado sobre o valor da gravidade observado gerando então o valor da gravidade sobre o geóide.

Para isto, é suposto que uma área circundante de uma estação gravimétrica P é completamente plana e horizontal, e supõe-se que as massas entre o geóide e a estação têm densidade constante (ρ). Então a atração (A_B), deste designado "Platô de Bouguer", uma vez que a placa, considerada plana, pode ser considerada como um cilindro de espessura (H), é obtido do gradiente de Bouguer, e é dado pela expressão 28 (HOFMANN-WELLENHOF & MORITZ, 2005)

$$A_B = 2\pi G\rho H \quad (28)$$

Fazendo $\rho=2,67 \text{ g.cm}^{-3}$ obtemos:

$$A_B = 0,1119 \times H_P \text{ (mGal)} \quad (29)$$

O processo combinado de aplicar a redução ao ar-livre (que permite levar a estação gravimétrica de P até P' e é equivalente a $0,3086 H_P \text{ (mGal)}$ e remover as massas topográficas correspondentes ao Platô de Bouguer é designado "redução simples de Bouguer". Dela resulta a gravidade de Bouguer sobre o geóide: ($g_{P'}^B$)

$$g_{P'}^B = g_P - A_B + 0,3086 H_P \quad (30)$$

Substituindo os valores da Equação (29) na Equação (30) ela assume a seguinte forma:

$$g_{P'}^B = g_P + 0,1967 H_P \quad (31)$$

Considerando agora o conceito de anomalia da gravidade, a anomalia simples de Bouguer (Δ_g^B) é calculada por:

$$\Delta_g^B = g_{P'}^B - \gamma_{P''} \quad (32)$$

Ou seja:

$$\Delta_g^B = g_P + 0,1967 H_P - \gamma_{P''} \quad (33)$$

O valor da gravidade normal ou gravidade teórica ($\gamma_{P''}$) é dado pelo Teorema de Clairaut, considerando os parâmetros do elipsoide internacional de 1980 assume a seguinte forma (MORITZ, 1984):

$$\gamma_{P''} = 978032,67715 \times (1 + 0,0053024 \times \text{sen}^2\varphi - 0,00000587 \times \text{sen}^2 2\varphi) \quad (34)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nessa seção serão descritos: a área de trabalho, os materiais e métodos empregados para atingir os objetivos deste trabalho.

Basicamente o Sistema Geodésico Brasileiro é composto por redes Planimétricas, Altimétricas e Gravimétricas mantidas pelo IBGE e de redes auxiliares mantidas por outras instituições. Para a realização deste trabalho é de fundamental importância conhecer as informações acerca de RRNN e marcos geodésicos já existentes na área de estudo, que abrange parte do município de Pontal do Paraná.

Estas informações, geralmente, se apresentam na forma de memoriais descritivos, sendo estes disponibilizados pelos diversos órgãos responsáveis pela materialização e levantamento destes pontos. Por meio de consulta à base de dados geodésicos do IBGE, considerando a rede altimétrica e a rede gravimétrica, é possível observar que na região de estudo existe apenas uma estação materializada pelo IBGE, sendo esta a RN 2049M, localizada no trevo da Praia de Leste. Esta mesma estação corresponde à estação gravimétrica 8114704 e estação GPS 94103, ou seja, estação que pertence às três redes geodésicas brasileira. A Figura 17 ilustra a localização geográfica desta estação, além de evidenciar a carência de informações geodésicas na região.

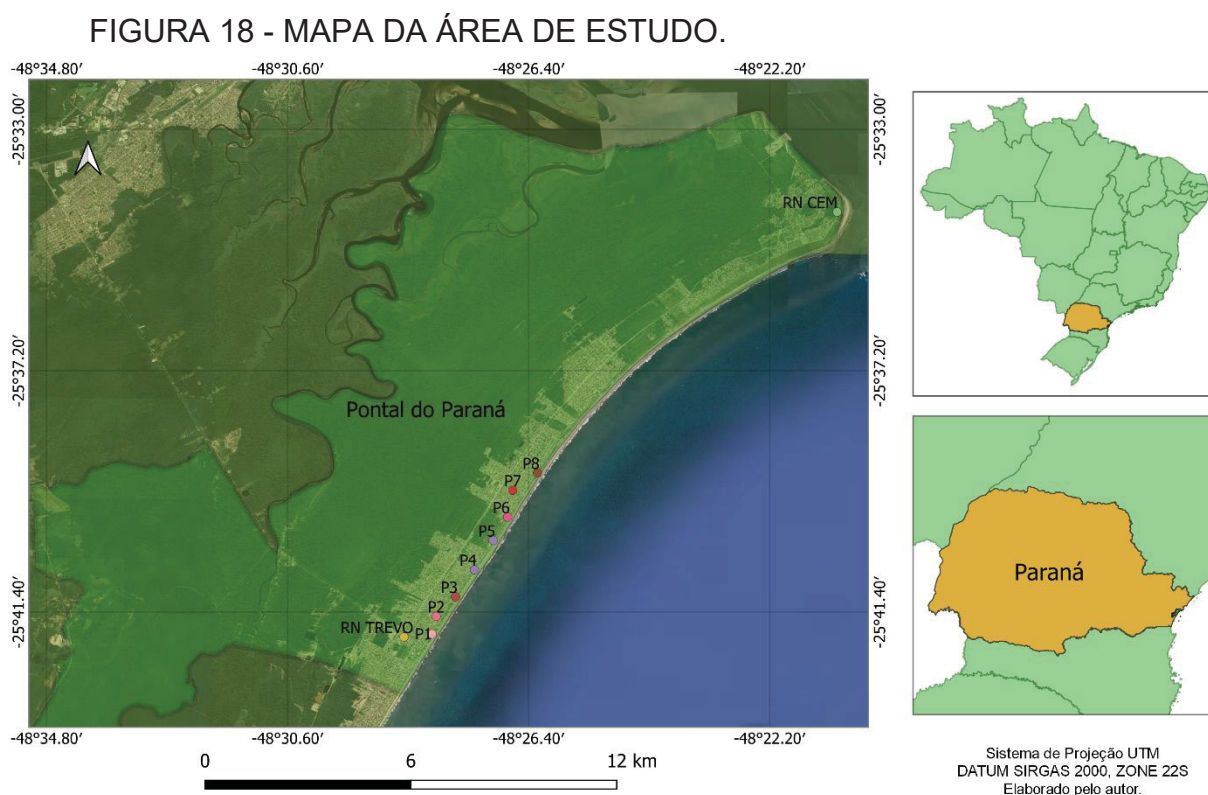
FIGURA 17 - REDE ALTIMÉTRICA E GRAVIMÉTRICA NA ÁREA DE ESTUDO.



Fonte: Base de Dados IBGE 2022.

3.1. ÁREA DE TRABALHO

A área que compreende o estudo localiza-se no município de Pontal do Paraná, abrangendo as praias de: Praia de Leste, Shangrilá e Pontal do Sul, onde foram implantados um conjunto de oito marcos geodésicos, conforme apresentado na Figura 18.



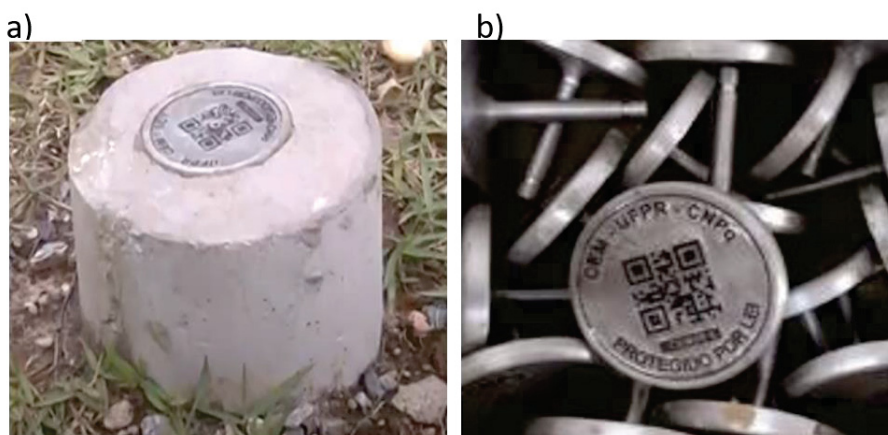
Fonte: O autor, 2021.

A materialização dos oito marcos geodésicos foi feita por meio de um projeto realizado pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Pontal do Paraná, visando fornecer uma estrutura padronizada com a implantação de uma Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM). Os marcos foram implantados nas proximidades da linha de costa, espaçados a cada quilômetro, sendo que um dos marcos foi implantado no Campus de Mirassol da UFPR.

Os marcos foram construídos em concreto e tem formato cilíndrico, as chapas de identificação foram confeccionadas em alumínio naval e possuem identificadores em QR-Code. As chapas têm 60mm de diâmetro e um pino de 60mm para fixação

(FIGURA 19). Já o QR-Code possibilita a leitura do código identificador e o acesso às informações da estação (FIGURA 20) (JUNIOR et al, 2021).

FIGURA 19 - A) CHAPA IDENTIFICADORA CRAVADA EM CONCRETO; B) IDENTIFICADOR GEODÉSICO.



Fonte: Adaptado de DE VARGAS et al., 2020.

FIGURA 20 - CHAPA METÁLICA, IDENTIFICADOR GEODÉSICO.



Fonte: O autor, 2022.

Os desníveis entre os marcos geodésicos foram determinados por nivelamento geométrico utilizando nível digital e miras com código de barras, adotando as tolerâncias que constam nas normas para o nivelamento de alta precisão (IBGE, 2017), e tendo início na RN 2049M localizada no trevo da Praia de Leste.

O levantamento gravimétrico contou com o transporte do valor da gravidade até a RN 2049M partindo do ponto gravimétrico situado no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da UFPR, localizado no Centro Politécnico, Curitiba – PR, cujo valor de gravidade é conhecido. Estas duas estações distam de aproximadamente 100km. Posteriormente foram ocupados os 8 marcos geodésicos além de uma RN localizada nas dependências do Centro de Estudos do Mar (CEM) da UFPR, para este circuito percorreu-se uma distância aproximada de 19km. Visando uma rede moderna, o levantamento gravimétrico foi realizado sobre os marcos utilizando um gravímetro digital.

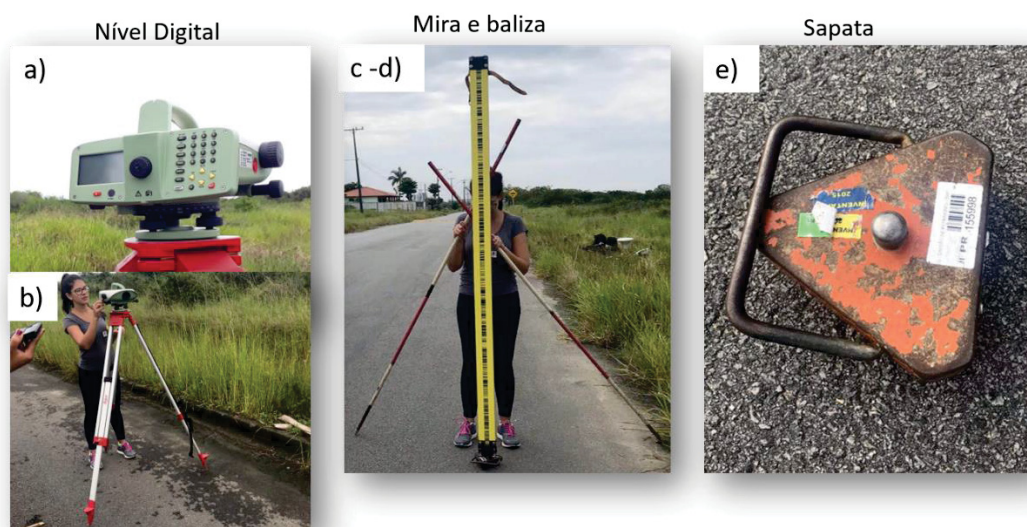
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NO LEVANTAMENTO DOS MARCOS GEODÉSICOS

3.2.1. Nivelamento Geométrico de alta precisão

Entre os marcos geodésicos existentes, foi realizado o nivelamento geométrico de alta precisão, utilizando o nivelamento duplo (nivelamento e contra nivelamento), partindo da RN 2049M. O levantamento foi realizado em abril de 2019, sendo que os seguintes equipamentos foram utilizados (FIGURA 21):

- a) 1 (um) Nível Digital Geodésico modelo DNA03 da Leica (com precisão nominal de 0,3 mm por km no duplo nivelamento);
- b) 1 (um) Tripé;
- c) 2 (duas) Miras de Ínvar;
- d) 4 (quatro) Balizas, utilizadas para apoiar, travar e manter as miras de ínvar verticalizadas.
- e) 2 (duas) Sapatas, utilizadas para apoiar a mira sobre a superfície terrestre, auxiliando no giro da mira entre os lances de nivelamento.

FIGURA 21 -EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA O NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.

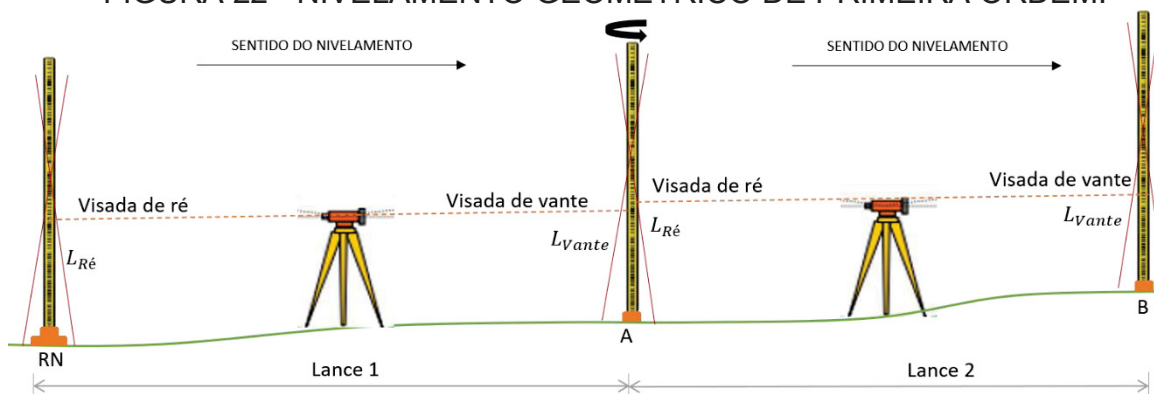


Fonte: O autor, 2021.

O método de visadas iguais foi empregado a fim de minimizar os erros de colimação, de curvatura terrestre e refração atmosférica. A técnica exige que se posicione o nível entre duas miras considerando que o alcance máximo da visada é de até 60 metros (IBGE, 2017b). Para o nivelamento realizado, optou-se por uma distância de 25m, atendendo a uma recomendação do fabricante do nível que indica limitar a distância entre o nível e a mira à um valor menor do que 30m na execução de nivelamentos de precisão (Leica, 2006), com tolerância de 2 metros para a diferença entre as distâncias das visadas de ré e vante.

Sabendo-se a altitude do ponto de partida, é possível conhecer a altitude do ponto de vante. No primeiro lance de nivelamento, estacionou-se a mira de ré sobre a RN 2049M sem a proteção na base, utilizando as balizas para travar e verticalizar a mira sobre o ponto.

FIGURA 22 - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE PRIMEIRA ORDEM.



Fonte: O autor, 2022.

O nível foi posicionado entre as duas miras (mira de ré e a mira vante), sendo corretamente nivelado sobre o tripé. A mira de ré foi posicionada na RN. A outra mira (mira de vante) foi posicionada sobre a sapata utilizando o protetor da base, com auxílio das balizas para travar e auxiliar na verticalidade da mira sobre o ponto. As leituras foram feitas na mira de ré e na mira de vante com o nível geodésico, obtendo os valores para a leitura do fio nivelador e a distância horizontal entre o nível e a mira. Após as leituras liberou-se a vante para realizar o giro sobre a sapata. Após a rotação da mira de vante, o nível é deslocado para o próximo ponto de leitura, e a mira de vante torna-se agora a próxima mira de ré (FIGURA 22).

3.2.2. Levantamento Gravimétrico

O levantamento gravimétrico envolveu a ocupação de 11 estações: a estação gravimétrica localizada no LAIG, a RN 2049M e os 8 marcos geodésicos implantados ao longo da área de estudo (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8), além de uma estação localizada no Centro de Estudos do Mar (CEM) da UFPR. As medidas da variação da gravidade foram obtidas pelo gravímetro digital modelo Scintrex CG-5 (FIGURA 23), a sua faixa de atuação abrange todas as regiões do globo, 8000 mGal, possui uma resolução de leitura de 0,001 mGal e uma deriva de 0,02 mGal/dia (SCINTREX, 2012).

FIGURA 23 - GRAVÍMETRO SCINTREX CG-5.



Fonte: O autor, 2022.

A estação gravimétrica localizada no Centro Politécnico pode ser considerada como uma estação de referência. Determinada num esforço conjunto entre a UFPR e a Universidade de Hannover, é uma das sete estações que foram estabelecidas pelo gravímetro absoluto JILAG3, dando origem à Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas - RENEGA (GEMAEL, 2012).

Em cada estação, o gravímetro foi posicionado sobre uma sapata triangular e nivelado por meio dos seus parafusos calantes. Para que o equipamento fique estabilizado é necessário aguardar no mínimo cinco minutos até que o gravímetro esteja pronto para realizar as leituras. O equipamento foi configurado para fazer cinco medições sobre o mesmo ponto, então a leitura final armazenada é o valor médio das medidas acompanhado da respectiva incerteza (erro e desvio padrão). De acordo com IBGE (2017), o erro das leituras deve apresentar valores inferiores a 0,010 mGal (discrepância entre as leituras realizadas na mesma estação) e o valor do desvio padrão deve ser inferior a 0,100 mGal, caso contrário a medição deve ser refeita.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos levantamentos geodésicos realizados na área de estudo: nivelamento geométrico de alta precisão e levantamento gravimétrico. Também são apresentados os resultados referentes ao cálculo dos números geopotenciais e altitudes normais dos marcos geodésicos.

4.1. NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTA PRECISÃO

Durante a execução do nivelamento geométrico, para cada seção foi realizado o nivelamento e o contra – nivelamento, com a finalidade de verificar o erro de fechamento da seção e posteriormente utilizar os desníveis medidos para calcular altitudes niveladas para os marcos geodésicos implantados na área de estudo. A linha do nivelamento teve início na RN 2049M com altitude normal $H = 4,8328\text{m}$, cujo relatório pode ser observado na FIGURA 24, seguindo até o marco P8. Na Tabela 1, é possível verificar um resumo dos resultados obtidos pelo nivelamento geométrico entre os pontos, são apresentados os erros permitido e cometido (calculado com base na Equação 19), os desníveis brutos, bem como a altitude nivelada dos marcos geodésicos calculada a partir da altitude normal da RN 2049M e dos desníveis brutos medidos.

TABELA 1 - RESULTADOS DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO POR SEÇÃO E ALTITUDES NIVELADAS.

Seção	Erro permitido (mm)	Erro cometido (mm)	Desnível (m)	Estação	Altitude Nivelada (m)
				RN 2049M	4,8328
RN2049M - P1	3,28	2,3	-1,2942	P1	3,5385
P1 - P2	2,60	0,6	0,6036	P2	4,1421
P2 - P3	3,07	0,7	-0,4689	P3	3,6732
P3 - P4	3,06	0,5	0,1163	P4	3,7895
P4 - P5	3,12	0,9	-1,0374	P5	2,7521
P5 - P6	2,88	2,2	0,6234	P6	3,3755
P6 - P7	3,23	0,4	0,9850	P7	4,3605
P7 - P8	3,19	0,0	-0,9368	P8	3,4237

Fonte: O autor, 2022.

A partir da Tabela 1, é possível observar que as seções com menor erro cometido foram entre P6 – P7 e P3 – P4, com valores de 0,4mm e 0,5mm,

respectivamente, no desnível entre P7 - P8 o erro cometido foi nulo. Já os maiores erros cometidos podem ser vistos nas seções RN 2049M - P1 e P5 – P6, com 2,3mm e 2,2mm, respectivamente. Sendo assim, pode-se constatar que a diferença máxima aceitável entre o nivelamento e o contra-nivelamento das seções atendeu à tolerância estabelecida pelas normativas do IBGE.

FIGURA 24 - RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA RN: 2049M.

IBGE		Relatório de Estação Geodésica			
Estação :	94103	Nome da Estação :	94103	Tipo :	Estação GPS
Município :	PONTAL DO PARANÁ			UF :	PR
Última Visita :	25/04/2019	Situação Marco Principal :	BOM	Última Atualização :	03/08/2021
Conexões :	EG : 8114704 RN : 2049M			Inscrição chapa :	2049M
DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	25° 41' 50,39269" S	Altitude Normal(m)	4,8328	Gravidade(mGal)	978.996,01
Longitude	48° 28' 33,26831" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Datum	RGFB
Altitude Geométrica(m)	4,807	Sigma Altitude(m)	0,048	Data Medição	18/06/2008
Fonte	GPS Geodésico	Datum	Imbituba	Data Cálculo	22/11/2011
Origem	Ajustada	Data Medição	29/06/1983		
Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	30/07/2018		
Data Medição	25/09/2017	Número Geopotencial (m ² /s ²)	47,313		
Data Cálculo	19/01/2018				
Sigma Latitude(m)	0,005				
Sigma Longitude(m)	0,005				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,023				
UTM(N)	7.155.413,737				
UTM(E)	753.300,519				
MC	-51				
<ul style="list-style-type: none"> - Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 30/07/2018 - REALT 2018 2ª edição disponível em : https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf - Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em : ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planialtimetrica/relatorio/rel_sirgas2000.pdf - Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em : https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10855-modelo-de-ondulacao-geoida.html - As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015 disponível em : ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/pr_01_2015_sirgas2000.pdf 					
Localização					
A 6 m da margem esquerda da Rod. PR-407, sentido Paranaguá - Pontal do Paraná, no trevo triangular de acesso para Curitiba, Paranaguá e Pontal do Sul, junto ao monumento do Rotary Internacional, além 1,85 km da ponte de concreto sobre o Rio Pery.					
Descrição					
Pilar de concreto piramidal medindo 0,13 m de altura, sobre uma base medindo 0,45 m x 0,45 m e no seu topo 0,18 m x 0,18 m, com uma chapa de metal.					



Fonte: IBGE, 2022.

4.2. LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO

A aquisição dos dados gravimétricos foi realizada pelo método relativo, no qual foi utilizado o Gravímetro digital SCINTREX CG5 para medição do valor relativo da aceleração da gravidade. Utilizou-se como referência a estação gravimétrica em Curitiba, pertencente a RENEGA, com valor de $g = 978760,377$ mGal, localizada no LAIG (FIGURA 25).

FIGURA 25 - ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA ABSOLUTA EM CURITIBA.



Fonte: MUGUIO et al., 2017.

O levantamento foi feito com base em uma linha gravimétrica simples, realizando a abertura e o fechamento do levantamento em uma mesma estação de referência. Foram feitos dois levantamentos gravimétricos: um em abril de 2019, envolvendo apenas as estações localizadas na área de estudo e que teve o início do circuito na estação gravimétrica do CEM; e outro levantamento em outubro de 2019, cujo circuito iniciou e finalizou na estação gravimétrica de Curitiba.

Na Tabela 2, são apresentados os dados do levantamento gravimétrico de outubro de 2019. São exibidos os resultados da correção de maré, da correção da deriva dinâmica (Equação 24), os desníveis gravimétricos (Equação 25) calculados com base nas leituras corrigidas e o valor da gravidade em cada estação (Equação 26).

TABELA 2 - LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO – OUTUBRO DE 2019.

Início Estação Curitiba		Hora: 10:09:22		OUTUBRO DE 2019		Circuito partindo de Curitiba							
Duração da DERIVA DINAMICA				Altitude ortométrica Curitiba				Latitude CTBA		Longitude CTBA			
6,68 -0,015				0,4882 3,5218				25°27'10,30"S		49°14'1,60"W			
Estação	Horas	Horas transf.	ΔT	LEITURA (mGal)	Correção de MARÉ δg_i (mGal)	Leitura corrigida da maré $Li + \delta g_i$ (mGal)	Correção da Deriva DINÂMICA (mGal)	Leitura corrigida da DERIVA DINÂMICA (mGal)	Desnível gravimétrico $\Delta G(Li - L1)$ (mGal)	Gravidade g (mGal)			
LAIG	10:09:22	10,16	0,00	2.789,036	-0,044	2.788,992	0	2.788,992	0	978.760,377			
CEM	12:03:53	12,06	1,91	3.000,123	0,049	3.000,172	-0,028846947	3.000,143	211,151	978.971,528			
RN 2049M	13:17:46	13,30	3,14	3.025,143	0,087	3.025,230	-0,047458287	3.025,183	236,191	978.996,568			
P1	13:27:44	13,46	3,31	3.026,794	0,089	3.026,883	-0,049968907	3.026,833	237,841	978.998,218			
P2	13:36:31	13,61	3,45	3.028,571	0,091	3.028,662	-0,052181444	3.028,610	239,618	978.999,995			
P3	13:45:55	13,77	3,61	3.035,612	0,092	3.035,704	-0,05454932	3.035,649	246,657	979.007,034			
P4	13:55:42	13,93	3,77	3.036,021	0,092	3.036,113	-0,057013759	3.036,056	247,064	979.007,441			
P5	14:03:10	14,05	3,90	3.027,721	0,092	3.027,813	-0,058894625	3.027,754	238,762	978.999,139			
P6	14:16:03	14,27	4,11	3.022,049	0,090	3.022,139	-0,062139959	3.022,077	233,085	978.993,462			
P7	14:26:26	14,44	4,28	3.018,230	0,088	3.018,318	-0,064755539	3.018,253	229,261	978.989,638			
P8	14:36:31	14,61	4,45	3.015,282	0,085	3.015,367	-0,067295548	3.015,300	226,308	978.986,685			
CEM	15:00:01	15,00	4,84	3.000,259	0,076	3.000,335	-0,073215239	3.000,262	211,270	978.971,647			
LAIG	16:50:19	16,84	6,68	2.789,094	-0,001	2.789,093	-0,101	2.788,992	0,000	978.760,377			

Os marcos geodésicos também foram ocupados por receptores GNSS. Cada marco foi rastreado por pelo menos uma hora e para a obtenção dos valores das coordenadas, foi utilizado o serviço *online* de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) disponibilizado pelo IBGE (IBGE-PPP), que possibilita a determinação das coordenadas de levantamentos GNSS realizados no modo absoluto. Este serviço faz uso do programa de processamento CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System*) desenvolvido pelo NRCan (*Natural Resources Canada*) (IBGE, 2017). A altitude elipsoidal das estações advindas do pós-processamento dos dados GNSS foi convertida em altitude ortométrica, por meio do modelo geoidal MAPGEO2015, os dados referentes a essa conversão são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – CONVERSÃO DE ALTITUDES ELIPSOIDAIS EM ALTITUDES ORTOMÉTRICAS COM O USO DO MAPGEO2015.

Estação	Latitude (ϕ)	Longitude (λ)	Altitude Elipsoidal - h (m)	Altitude Geoidal - N (m) (MAPGEO)	Altitude Ortométrica – H (m) H = h - N
RN 2049M	-25° 41' 50,3927"	-48° 28' 33,2718"	4,67	-0,31	4,98
P1	-25° 41' 46,7096"	-48° 28' 05,0894"	3,50	-0,34	3,84
P2	-25° 41' 28,0941"	-48° 28' 00,7231"	4,04	-0,34	4,38
P3	-25° 41' 07,9529"	-48° 27' 40,4671"	3,47	-0,36	3,83
P4	-25° 40' 39,4659"	-48° 27' 20,6384"	3,65	-0,36	4,01
P5	-25° 40' 09,9084"	-48° 27' 00,9457"	2,55	-0,36	2,91
P6	-25° 39' 44,7504"	-48° 26' 45,9425"	3,20	-0,37	3,57
P7	-25° 39' 16,7048"	-48° 26' 40,7881"	4,07	-0,37	4,44
P8	-25° 38' 58,6001"	-48° 26' 14,8646"	3,05	-0,39	3,44
CEM	-25°34'24"	-48°20'59"	4	-0,69	4,69

Também foram calculados os valores de gravidade teórica (Equação 34) em relação ao elipsoide de referência GRS80, o efeito do não paralelismo (Equação 1) das superfícies equipotenciais e a anomalia Bouguer (Equação 33), com a finalidade de obter as altitudes ortométricas normais calculadas (TABELA 4), essas altitudes eram consideradas até julho de 2018, e serão posteriormente comparadas com as altitudes normais calculadas baseadas em número geopotencial.

TABELA 4 - ALTITUDES ORTOMÉTRICAS NORMAIS CALCULADAS.

Estação	Lat Decimal	$\Delta\Phi$	Correção não paralelismo (C)	GRAVIDADE NORMAL (mGal)	ANOMALIA BOUGUER (mGal)	ALTITUDE ORTOMETRICA NORMAL (CALCULADA NIV) (m)
RN 2049M	-25,6973	0,00102	-7,10E-08	979006,9216	-9,7621319	4,9799
P1	-25,6963	0,00517	-2,77E-07	979006,8493	-8,2707028	3,8399
P2	-25,6911	0,00559	-3,40E-07	979006,4836	-6,0285546	4,3799
P3	-25,6855	0,00791	-4,18E-07	979006,0879	1,2926284	3,8300
P4	-25,6776	0,00821	-4,50E-07	979005,5285	2,2889343	4,0100
P5	-25,6694	0,00699	-2,76E-07	979004,9481	-5,6528541	2,9099
P6	-25,6624	0,00779	-3,74E-07	979004,4543	-10,7111198	3,5699
P7	-25,6546	0,00503	-2,98E-07	979003,9039	-13,8165772	4,4399
P8	-25,6496	0,07628	-3,48E-06	979003,5486	-16,6137985	3,4399
CEM	-25,5733	0,12053	-6,73E-06	978998,1663	-26,026786	4,6898

Os dados do levantamento gravimétrico realizado em abril de 2019, foram usados apenas para comparar os valores da gravidade obtidos para os marcos geodésicos em épocas diferentes. Para este levantamento em particular só foram

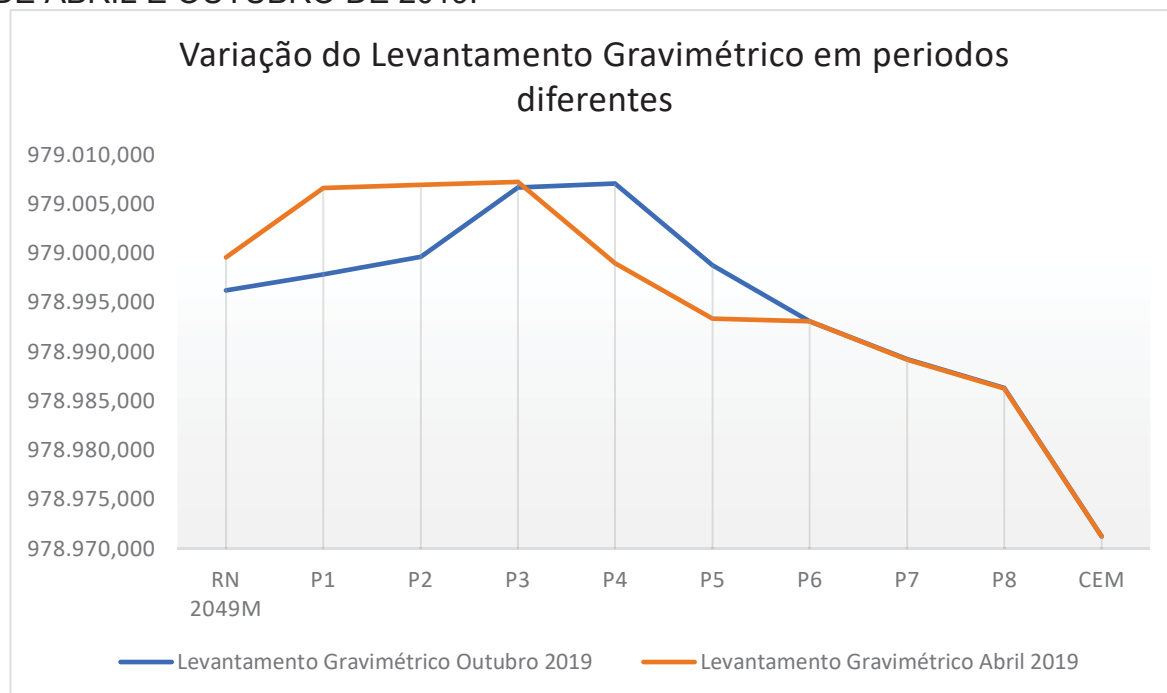
ocupadas as estações localizadas em Pontal do Paraná, e o circuito considerou como referência a estação localizada no CEM com o valor da gravidade 978971,217 mGal, conforme publicado no trabalho realizado por Gemael et al., (2002). Os dados do levantamento e resultados encontram-se na Tabela 5.

TABELA 5 - LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO - ABRIL DE 2019.

Início Estação		Hora:		ABRIL DE 2019 Circuito partindo do CEM						
CEM		12:03:53		Latitude_CEM		Longitude_CEM				
Duração da DERIVA DINÂMICA		3,21		25°34'24"S		48°20'59" W				
-0,010590984										
Estação	Horas	Horas transf.	ΔT	LEITURA (mGal)	Correção de MARÉ δg_i (mGal)	Leitura corrigida da maré $Li + \delta g_i$ (mGal)	Correção da Deriva DINÂMICA (mGal)	Leitura corrigida da DERIVA DINÂMICA (mGal)	Desnível gravimétrico $\Delta G(Li - L1)$ (mGal)	Gravidade g (mGal)
CEM	14:12:46	14,21	0,00	3.043,073	-0,038	3043,035	0	3043,035	0	978971,217
RN 2049M	14:49:30	14,83	0,61	3.071,439	-0,033	3071,406	-0,006484036	3071,399516	28,36451596	978999,582
P1	15:03:46	15,06	0,85	3.078,477	-0,031	3078,446	-0,009002336	3078,436998	35,40199766	979006,619
P2	15:14:58	15,25	1,04	3.078,776	-0,029	3078,747	-0,01097932	3078,736021	35,70102068	979006,918
P3	18:07:44	18,13	3,92	3.079,059	0,017	3079,076	-0,041475469	3079,034525	35,99952453	979007,217
P4	18:22:27	18,37	4,16	3.070,823	0,016	3070,839	-0,044073202	3070,794927	27,7599268	978998,977
P5	18:34:37	18,58	4,36	3.065,156	0,014	3065,170	-0,046220819	3065,123779	22,08877918	978993,306
P6	16:34:08	16,57	2,36	3.064,892	-0,012	3064,880	-0,024953535	3064,855046	21,82004647	978993,037
P7	16:46:31	16,78	2,56	3.061,025	-0,009	3061,016	-0,027139396	3060,988861	17,9538606	978989,171
P8	16:58:30	16,98	2,76	3.058,088	-0,007	3058,081	-0,029254651	3058,051745	15,01674535	978986,234
CEM	17:25:23	17,42	3,21	3.043,072	-0,003	3043,069	-0,034	3043,035	0	978971,217

O Gráfico 1 a seguir, mostra os valores de gravidade obtidos para os levantamentos gravimétricos realizados em abril de 2019 e em outubro de 2019. No gráfico é possível observar que os pontos RN 2049M, P1, P2, P4 e P5 apresentam uma maior diferença nos valores da gravidade, para mensurar essa diferença encontrada temos a estação gravimétrica RN 2049M do IBGE com o valor de $g = 978.996,01$ mGal, comparando esse valor aos dados de abril/19 se tem uma diferença de 3,572mGal, já em outubro/19 essa diferença é de 0,558 mGal, ressaltando que os levantamentos gravimétricos possuem estações iniciais de referência diferentes. Em função das diferenças encontradas para o valor da gravidade na RN 2049M, optou-se por utilizar os dados do levantamento realizado em outubro de 2019 no cálculo dos números geopotenciais e conseqüentemente das altitudes normais.

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS GRAVIMÉTRICOS DE ABRIL E OUTUBRO DE 2019.



4.3. NÚMEROS GEOPOTENCIAIS E ALTITUDES NORMAIS

Para o cálculo das altitudes normais a partir do número geopotencial, observados na Tabela 6, foram usados os valores de gravidade e os desníveis mensurados em campo, bem como um valor de gravidade normal, a sequência de cálculo para a obtenção da altitude normal é dada a seguir.

Com as informações do desnível e o valor médio da gravidade observada em cada seção de nivelamento, calculou-se a variação do número geopotencial através da Equação (4). Utilizando a RN 2049M como referência, uma vez que o número geopotencial é conhecido e igual a $47,313\text{m}^2/\text{s}^2$, foi possível determinar o número geopotencial nos demais marcos geodésicos.

Além dos números geopotenciais, o cálculo das altitudes normais (Equação 15) requer o conhecimento de um valor médio para a gravidade normal que é obtido de forma iterativa como apresentado na Equação (16). Para a execução desse cálculo iterativo considerou-se como valor inicial para as altitudes, o valor das altitudes ortométricas normais calculadas (TABELA 4). Posteriormente dividiu-se o número

geopotencial pelo valor médio da gravidade normal, obtendo-se assim a altitude normal de cada marco geodésico (Tabela 6).

TABELA 6 - NÚMEROS GEOPOTENCIAIS E ALTITUDES NORMAIS.

PONTO	Gravidade g (mGal)	ΔH Nivelamento (m)	GRAVIDADE MÉDIA (m/s ²)	Diferença de número geopotencial (m ² /s ²) $\Delta C_{AB} \approx g_{AB} \Delta H_{AB}$	Número Geopotencial (m ² /s ²)	Alt. NORMAL (m)
RN2049M	978996,568				47,313	4,8328
P1	978998,218	-1,29425	9,789974	-12,671	34,642	3,5374
P2	978999,995	0,6036	9,789991	5,909	40,552	4,1407
P3	979007,034	-0,4690	9,790035	-4,591	35,961	3,6721
P4	979007,441	0,1164	9,790072	1,139	37,100	3,7882
P5	978999,139	-1,0375	9,790033	-10,157	26,943	2,7512
P6	978993,462	0,6234	9,789963	6,103	33,046	3,3757
P7	978989,638	0,9850	9,789916	9,643	42,689	4,3609
P8	978986,685	-0,9368	9,789882	-9,171	33,518	3,4241

As altitudes normais calculadas a partir dos números geopotenciais foram comparadas com as altitudes normais obtidas a partir do modelo hgeoHNOR, como indicado anteriormente, os marcos foram levantados com GNSS logo tem altitudes elipsoidais conhecidas e estas foram convertidas em altitudes normais por meio do modelo hgeoHNOR2020. A Tabela 7 apresenta os valores das altitudes normais calculadas a partir dos números geopotenciais e as convertidas a partir do modelo, bem como a diferença entre ambas.

TABELA 7 - COMPARAÇÃO DAS ALTITUDES NORMAIS CALCULADAS.

PONTO	Alt. NORMAL CALCULADA (m)	hgeoHNOR (Alt. Normal Convertida (m))	Diferença entre as Altitudes Normais (cm)
RN2049	4,83	4,83	0,00
P1	3,53	3,61	-7,26
P2	4,14	4,19	-4,93
P3	3,67	3,65	2,21
P4	3,78	3,81	-2,18
P5	2,75	2,74	1,12
P6	3,37	3,40	-2,43
P7	4,36	4,26	10,09
P8	3,42	3,26	16,41

A conversão da altitude elipsoidal em normal é apresentada no próprio relatório do processamento PPP com duas casas decimais, em função disso, optou-se por apresentar os resultados da Tabela 7 com este mesmo número de casas decimais. É possível observar que as diferenças entre as altitudes normais calculadas a partir do número geopotencial e as altitudes normais convertidas pelo hgeoHNOR tem uma variação entre 1,12cm no ponto P5 e de 16,41cm no ponto P8, esses valores apresentam-se coerentes com a própria avaliação do modelo hgeoHNOR, uma vez que IBGE (2021) indica que 85,3% das estações utilizadas na avaliação do modelo têm resíduos entre +- 10cm e 95,2% das estações têm resíduos entre +-18cm.

A Tabela 8 apresenta uma comparação entre as altitudes normais a partir dos números geopotenciais e as obtidas com o modelo hgeoHNOR, cujos valores foram apresentados na Tabela 7) com as altitudes ortométricas, obtidas a partir da conversão das altitudes elipsoidais com o modelo MAPGEO2015 (cujos valores foram apresentados na Tabela 3). Pelo fato de serem altitudes vinculadas à diferentes superfícies de referência, as diferenças encontradas são maiores das que as apresentadas na Tabela 7.

Na comparação entre as altitudes ortométricas derivadas do MAPGEO2015 e as normais obtidas com o modelo hgeoHNOR, o ponto P1 apresentou o maior valor de diferença, sendo de 23cm, este mesmo ponto apresentou uma diferença de 30cm quando comparada a altitude ortométrica e a altitude normal calculada a partir do número geopotencial.

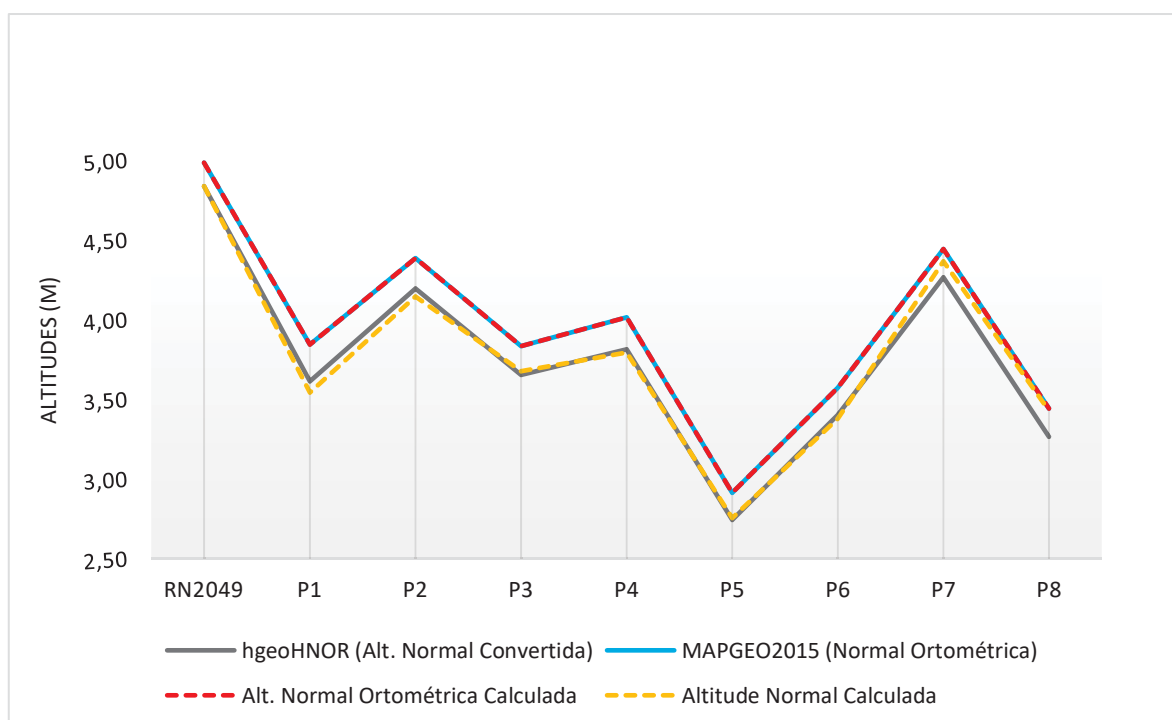
Estes valores maiores apresentados para as diferenças na Tabela 8 reforçam a importância do desenvolvimento do modelo hgeoHNOR visando a transformação de altitudes elipsoidais em altitudes vinculadas à componente altimétrica do SGB.

TABELA 8 - COMPARAÇÃO DAS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS E ALTITUDES NORMAIS

Estação	Altitude ortométrica (MAPGEO2015) (m)	Alt. Normal Convertida (hgeoHNOR) (m)	Altitude Normal Calculada (m)	Diferença entre a Alt. Normal (hgeoHNOR) e a Alt. Ortométrica (MAPGEO2015) (cm)	Diferença entre a Alt. Ortométrica (MAPGEO2015) e a Alt. Normal Calculada (cm)
RN2049	4,98	4,83	4,83	14,72	14,72
P1	3,84	3,61	3,53	23,00	30,15
P2	4,38	4,19	4,14	19,00	23,85
P3	3,83	3,65	3,67	18,00	15,71
P4	4,01	3,81	3,78	20,00	22,10
P5	2,91	2,74	2,75	17,00	15,79
P6	3,57	3,40	3,37	17,00	19,45
P7	4,44	4,26	4,36	18,00	07,93
P8	3,44	3,26	3,42	18,00	01,61

No Gráfico 2 estão representadas as altitudes obtidas para os marcos implantados na região de estudo, é possível visualizar a diferença sistemática que existe entre as altitudes normais e a altitude ortométrica das estações salientando o fato destas altitudes estarem vinculadas à superfícies de referencia diferentes.

GRÁFICO 2 - ALTITUDES NORMAIS E ALTITUDES ORTOMÉTRICAS.



5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho teve por objetivo principal contribuir com a implantação de uma rede vertical de referência no litoral do Paraná, baseada em números geopotenciais. Para tanto foram utilizados dados provenientes de nivelamento geométrico e de levantamento gravimétrico, realizados na área de estudo. A revisão bibliográfica acerca do tema, contribuiu para a realização dos cálculos geodésicos para calcular os números geopotenciais e as altitudes normais dos vértices da rede a partir do conhecimento do número geopotencial da RN 2049 localizada no trevo de Praia de Leste.

Dessa forma, a rede implantada tem informações gravimétricas, GNSS, números geopotenciais e altitudes normais. Essas informações são fundamentais para projetos de monitoramento da região costeira e contribuem imensamente com o desenvolvimento da região, pois fornecem o apoio geodésico necessário para projetos de drenagem, modernização de estradas e vias de acesso, estudos de impactos ambientais, projetos de esgoto e água, atualização cadastral, dentre inúmeros outros.

Com relação ao nivelamento geométrico dos vértices, observou-se que todos os desníveis foram determinados dentro das especificações de levantamentos geodésicos estabelecidas pelo IBGE, a magnitude dos erros cometidos variaram de 0,0mm a 2,3mm.

Com relação ao levantamento gravimétrico as discrepâncias nos valores de gravidade dos vértices quando comparadas as campanhas realizadas em abril e outubro de 2019. Analisando o valor de gravidade da RN 2049M, que também é uma estação gravimétrica, obteve-se uma diferença entre o valor de gravidade conhecido e o medido de 3,572mGal em abril e de 0,558mGal em outubro. Desta forma, optou-se pelos dados do levantamento gravimétrico realizado em outubro de 2019 para o cálculo dos números geopotenciais.

As altitudes normais calculadas a partir do número geopotencial foram comparadas com altitudes derivadas da aplicação do modelo hgeoHNOR2020, neste caso as diferenças encontradas variaram de cerca de 1cm até 16cm, conforme apresentado na Tabela 7. Estas diferenças estão condizentes com a avaliação baseada nos resíduos do próprio modelo.

As altitudes ortométricas dos vértices, calculadas a partir do conhecimento das altitudes elipsoidais dos vértices e da altitude geoidal do modelo MAPGEO2015, também foram comparadas com as altitudes normais dos vértices (Tabela 8 e Gráfico 2), esta comparação reforça a importância do desenvolvimento do modelo hgeoHNOR para o caso das aplicações que requerem a transformação de altitudes elipsoidais em altitudes vinculadas à componente altimétrica do SGB.

Visto em pesquisas recentes e na modernização da atual RAAP, é essencial a busca de um sistema altimétrico consistente em âmbito global, visto que, com os avanços tecnológicos é possível prover melhorias da qualidade e da precisão de sistemas geodésicos de referência, integrando aspectos geométricos e aspectos físicos da Terra. O cálculo de altitudes baseadas no número geopotencial é um passo nessa direção.

A determinação de altitudes com significado físico, obteve destaque com a divulgação das novas altitudes disponibilizadas pelo IBGE em 2018. Esse tema, é uma problemática que vem sendo estudada dentro da Geodésia não apenas no Brasil, mas em todo o território mundial, buscando a definição e realização de sistemas altimétricos baseados no potencial da gravidade e em números geopotenciais, respectivamente, uma vez que os referenciais verticais ainda possuem características clássicas e se carece de dados relacionados ao campo de gravidade da Terra.

Por fim, vale ressaltar a importância da linha de nivelamento efetuada e o levantamento gravimétrico realizado sobre os marcos, em uma área que carece de estrutura e informações geodésicas para apoio às mais diversas atividades.

Como recomendação futura, se sugere a implantação de mais marcos geodésicos na região que propiciem os levantamentos na forma de circuitos fechados com a finalidade de realizar o ajustamento das observações e estimar a qualidade dos resultados. Recomenda-se a execução de novos levantamentos gravimétricos na região a fim de verificar os valores de gravidade encontrados. Recomenda-se também a verificação de abalo dos vértices, por meio da repetição do nivelamento geométrico, uma vez que a área é sujeita a obras de infraestrutura que podem acarretar na movimentação dos vértices.

REFERÊNCIAS

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. DE. **A Evolução Dos Referenciais Usados Em Geodesia: A Era Moderna**, p. 3–16, 2011.

BRASIL. Ministério Do Meio Ambiente. **A zona costeira e seus múltiplos usos**. Disponível em < <https://antigo.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/zona-costeira-e-seus-m%C3%BAltiplos-usos.html> >, 2021.

BRAUM, S.; HODECKER-DIETRICH, A.; AUMOND, J. J. **Mangues, cidades e mudanças climáticas: a importância dos ecossistemas costeiros para as cidades de Itajaí e Joinville (SC) diante dos prognósticos da elevação do nível do mar**. 2017.

COSTA, M. C. **O Impacto Da Maré Barotrópica Global Em Escalas Climáticas**. 2017. 117 f. Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

COSTA, S. M. A.; FORTES, L. P. S. **A Evolução Da Geodésia: da Observação às Estrelas Aos Satélites**. Revista Brasileira de Geografia, v. 64, n. 1, p. 136-145, jan./jun. 2019.

DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. R. C. **Sistemas Geodésicos de Referência: Rumo ao GGRS/GGRF**. Revista Brasileira De Cartografia, v. 72, p. 962-82, 2020.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C; DALAZOANA, R. **Análise de séries temporais maregráficas correlacionadas com observações GNSS no datum vertical brasileiro de Imbituba-SC**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 68, n. 1, p. 73-90, 2016.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. **Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. Revista Cartográfica, n. 98, p. 33–57, 2019.

DE FREITAS, S. R. C. **Estratégias para uma nova definição do Datum Vertical Brasileiro e realização da Rede Vertical Brasileira visando suas integrações com o SIRGAS**. II Simpósio Brasileiro de Geomática Presidente Prudente–SP; UNESP. Presidente Prudente, p. 440-446, 2007.

DE FREITAS, S. RC.; MANTOVANI, M. S. M. **Contribuição ao Estudo de Características Tectônicas da Placa Sul-Americana a Partir de Análise das Marés Terrestres**. In: 3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society. European Association of Geoscientists & Engineers, 1993.

DE VARGAS, R. R., DE NAZARÉ MARTINS, L. D., LOPES, A. B., DA SILVA, R. M., NETO, R. F., JUNIOR, H. D. **Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento e acesso a informações de redes geodésicas eficiente**. Revista Brasileira de Geomática, v. 8, n. 1, p. 026-039, 2020.

DREWES, H. **Geodetic reference frames: IAG Symposium Munich, Germany 9-14 October 2006**. International Association of Geodesy Symposia, v. 134, n. February 2017, p. 1–2, 2009.

DREWES, H., KUGLITSCH, F., ADÁM, J. *et al.* **The Geodesist's Handbook 2016**. Journal of Geodesy **90**, 907–1205, 2016.

DE FREITAS, S. R. C., BLITZKOW, D. **Altitudes e geopotencial**. IGeS Bulletin, p. 47-62, 1999.

GAGG, G. **Emprego de dados gravimétricos e de altimetria por satélite como subsídio à análise morfoestrutural na região da Bacia de Pelotas-Rio Grande do Sul**. 2014. 137 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Setor de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Ed. UFPR, 304p. Curitiba, 1999.

GEMAEL, C., DE FREITAS, S. R. C., FAGGION, P. L., SILVA JUNIOR, J. S., & SIMÕES, K. **Rede Gravimétrica Científica para o Estado do Paraná**. Simpósio Brasileiro de Geomática, p. 105-109, 2002..

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). Global Geodetic Observing System. 2020. Disponível em: Acesso em: agosto. 2022

HOFMANN-WELLENNHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. New York: SpringerWien, p. 404, 2005.

IHDE, J.; SANCHEZ, L.; BARZAGHI, R.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; MARTI, U.; PAIL, R.; SIDERIS, M. **Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRIS)**. Surveys in Geophysics, v.38, n.3, p.549-570, 2017.

INDE. **Assembleia geral da ONU aprova estrutura geodésica global**. Boletim da INDE. Ano 5, nº 6, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015**. 65 p. Rio de Janeiro, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Esclarecimentos sobre a relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e os Níveis de Redução e “Zeros” Hidrográficos no Litoral Brasileiro**. Rio de Janeiro. 2017a. Disponível em: < ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/relacao_dvsgb_nr_zh.pdf >

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro. 2017b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Relatório: **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais REALT-2018**. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais**. 2ª ed., 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Modelo hgeoHNOR2020 para conversão de altitudes geométricas em altitudes normais / IBGE**. Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2021.

JESUS, R. M. L. DE; DE FREITAS, S. R. C. **Potencialidade do Uso de Dados Geofísicos Aerolevantados para Aplicações Geodésicas**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 72, n. 1, p. 19-33, 30 mar. 2020.

JUNIOR, H. D.; LOPES, A. B.; CRUZ, W. DA; VARGAS, R. R.; FAGGION, P. L. **Determinação da rede de referência cadastral no município de Pontal do Paraná – PR**. Revista Brasileira de Geomática. Curitiba, v. 9, n. 2, p. 087-102, jan./mar. 2021.

KRELLING, A. P.; SOARES, C. R. **Caracterização sócio-ambiental da Ponta do Poço, Pontal do Paraná**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Paraná, 2004.

Leica Geosystems. **Leica DNA03/DNA10 Manual do utilizador**. Versão 2.0. 2006. Heerbrugg, Suíça.

LENZ, G. H. **Modelagem E Inversão Gravimétrica No Estudo Da Geometria Do Embasamento Do Gráben De Casa De Pedra, Bacia De Volta Redonda-Rj**. 46 f. 2020. Dissertação de Mestrado em Dinâmica Oceânica e Terrestre - Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

LONGMAN, I. M. **Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun**. Journal of Geophysical Research, v. 64, n. 12p. 2351-2355, 1959.

LUZ, R. T. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. 228 f. 2008. Tese de Doutorado.– Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LUZ, R. T. **Cálculo de altitudes científicas e sua aplicação no reajustamento da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. Revista Brasileira de Geografia, v. 61, n. 1, p. 79-97, 2016.

MORITZ, H. Geodetic reference system 1980. Bulletin géodésique, v. 58, n. 3, pág. 388-398, 1984.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: **Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.

MUGUIO, M. R., FAGGION, P. L., VEIGA, L. A. K., NADAL, C. A., DA CRUZ, W. A., SOARES, M. A., & FIGUEIRA, I. F. R. **AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DA GRAVIDADE NA REGIÃO DO BARRAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ**. Boletim Paranaense de Geociências, v. 73, n. 1, 2017.

NICACIO, E.; DALAZOANA, R. **Passado e presente dos Modelos Globais do Geopotencial: uma abordagem conceitual sobre sua evolução**. Revista Eletrônica Multidisciplinar FACEAR, v. 2, n. 6, p. 1-15, 2017.

NICACIO, E. L.; SANTACRUZ JARAMILLO, A. G.; ZANETTI, G. Z.; FAGGION, P. L. **Avaliação de técnicas de nivelamento e métodos de posicionamento GNSS para determinação de desnível de primeira ordem**. Revista Brasileira de Geomática, v. 6, n. 4, p. 274, 2018.

NICACIO, E.; DALAZOANA, R. **O emprego da Solução do Problema de Valor de Contorno da Geodésia à Vinculação Nacional a um Sistema Vertical de Referência Global: uma Revisão Conceitual**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 71, n. 1, p. 122–148, 2019.

PBMC: Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. 2016.

PORTOS DO PARANÁ. **Portos movimentam 57 milhões de toneladas e consolidam recorde**. Logística Inteligente, 06 jan. 2021. Disponível em: <<http://www.portosdoparana.pr.gov.br/Noticia/Portos-movimentam-57-milhoes-de-toneladas-e-consolidam-recorde>>

POUTANEN, M., et al. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) in: **The Geodesist's Handbook 2020**. Journal of Geodesy, v. 94, n. 11, p. 342, 2020.

RIBEIRO, L. C.; DO NASCIMENTO GUIMARÃES, G; DE OLIVEIRA CAMARGO, P. **Contribuição para a Implantação do IHRF no Estado de São Paulo**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters v. 19, p. 1-5, 2021.

SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. **Vertical Datum unification for the international height reference system (IHRF)**. Geophysical Journal International, v. 209, n. 2, p. 570-586, 2017.

SANTANA, T. A. **Contribuições para os Estudos de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marinha ao Longo da Costa Brasileira. 2020. 140 f.** 2020. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas)–Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCINTREX. **CG-5 Operation Manual**, SCINTREX Limited, 222 Snidercroft Road Concord, Ontario Canada, 8ª ed., 2012.

SILVA, L. M. DA; FREITAS, S. R. **Correia de. Análise da evolução temporal do datum vertical brasileiro de Imbituba**. Revista cartográfica, n. 98, p. 33-57, 2019.

SILVA, R. N. F. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de vaso para a UHE Mauá**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, UFPR, Curitiba.

SOARES, S.; SANTOS, E. G.; LUZ, R. T. **Rede Geodésica de Referência**

Costeira: Ações preliminares para integração de altitudes e profundidades. In: XIII SIMPÓSIO SOBRE ONDAS, MARÉS, ENGENHARIAS OCEÂNICA E OCEANOGRAFIA POR SATÉLITE, 2019.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. **Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 72, n. 2, p. 345-364, 2020.

VEIGA, L. A. K; ZANETTI, M. A. Z; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia.** Departamento de Geomática. Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, UFPR. 2012, 274 f. Disponível em:
http://www.cartografica.ufpr.br/docs/topo2/apos_topo.pdf