



Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios

Integration of Land and Sea Vertical References: Involved Concepts, Developed Projects and Challenges

Tulio Alves Santana¹ e Regiane Dalazoana²

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia / Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Monte Carmelo, Brasil. tulio.santana@ufu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-9409>

² Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil. regiane@ufpr.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-0679>

Recebido: 02.2020 | Aceito: 03.2020

Resumo: No Brasil, os Níveis de Redução (NREDs) das Estações Maregráficas (EMs) são utilizados como os *Data* verticais oceânicos ou *Chart Datum* (CD) os quais são referências para as cartas náuticas confeccionadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Em contrapartida ao que é adotado no país, a Organização Hidrográfica Internacional (IHO) recomenda que a superfície usada como referência para obtenção do *Datum* para reduções de sondagens em zonas costeiras seja definida pela superfície LAT (*Lowest Astronomical Tide*) calculada a partir de pelo menos 18,6 anos de observações maregráficas. A unificação do referencial vertical oceânico e a integração entre os referenciais verticais é algo que se tem almejado para a costa brasileira por meio de parcerias entre diversas instituições e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Adotar uma superfície dada pela LAT solucionaria os problemas apresentados pela adoção dos NREDs como CD: o caráter local; o fato de que algumas profundidades podem ser menores do que as constantes na carta; a questão da determinação de cada NREDs em épocas distintas; a falta de padronização da extensão das séries temporais para quantificação dos NREDs e, sobretudo, a impossibilidade de conexão ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS). Com o objetivo de contribuir com as discussões relativas à temática da integração dos referenciais verticais em região costeira, este artigo apresenta conceitos envolvidos, projetos já desenvolvidos em outras regiões do mundo e alguns desafios inerentes ao Brasil, para a unificação do referencial oceânico e a integração dos referenciais verticais.

Palavras-chave: Níveis de Redução. *Chart Datum*. Unificação do referencial vertical oceânico. *Lowest Astronomical Tide*.

Abstract: The Reduction Levels (RLs) of Tide Gauge (TG) are used, in Brazil, as Ocean Vertical *Data* or *Chart Datum* (CD) which are references to nautical charts made by the Hydrography and Navigation Board of the Brazilian Navy (DHN- Diretoria de Hidrografia e Navegação in Portuguese). In contrast to that was adopted in Brazil, the International Hydrographic Organization (IHO) recommends that the *Datum* reference surface for survey reductions in coastal zone may be defined by the LAT (*Lowest Astronomical Tide*) calculated from at least 18.6 years of tide gauge observations. The unification of the *Chart Datum* and the vertical reference integration has been aimed for the Brazilian coast through partnerships between several institutions and the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística in Portuguese). Adopting a surface given by the LAT would solve the problems presented by adopting the RLs as CD, such as: the local coverage; the fact that some depths may be smaller than those presented in the chart; the question of determining each RL at different times; the lack of standardization about the time series extension to quantify the RL; and, above all, the impossibility of the connection to the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas in Portuguese). In order to contribute to the discussions concerning the integration of vertical reference in coastal regions, this article presents concepts involved, projects already developed in other regions of the world and some challenges inherent to Brazil for the unification of the oceanic reference and integration of vertical reference.

Keywords: Reduction Levels. *Chart Datum*. Unification of the oceanic vertical reference. *Lowest Astronomical Tide*.

1 INTRODUÇÃO

No que se refere ao monitoramento da dinâmica do planeta, tem sido observada, ao longo do tempo, a tendência de elevação do nível do mar, principalmente, baseada na análise da evolução do Nível Médio do Mar Global, doravante (NMMG). O NMMG pode ser quantificado por meio de observações maregráficas pontuais a partir de Estações Maregráficas (EMs) espalhadas pelo planeta e com dados de satélites altímetros. De posse dos dados fornecidos pelos satélites altímetros, compreendidos entre os anos de 1993 e 2017, grupos de pesquisas estimaram uma taxa de elevação do NMMG entre 3,28 e 3,44 mm/ano (CLS, 2018).

Sendo assim, motivada pela elevação do NMMG, a investigação do comportamento do nível do mar deve ocorrer, em especial, nas Zonas Costeiras de Baixa Elevação (ZCBE): essas regiões são áreas contíguas ao longo da costa que estão a menos de 10 m do Nível Médio do Mar (NMM). Em extensão, as ZCBE estão em sua grande parte compreendidas até 100 km da costa, com ressalva para regiões com grandes desembocaduras, como é o caso do Rio Amazonas; abrangem 2% da área terrestre do mundo, em contraponto, contém 10% da população mundial e 13% da população urbana mundial (MCGRANAHAN; BALK; ANDERSON, 2007).

De acordo com Neumann et al. (2015), 625 milhões de pessoas vivem em zonas costeiras e um crescimento populacional é esperado para os próximos anos. Destarte, observa-se que as variações ao longo do tempo devido à dinâmica do planeta, tais como, a elevação do nível do mar e os eventos extremos, podem ocasionar grandes impactos aos sistemas ecológicos e humanos nas zonas costeiras, em essencial, observando a tendência de elevação do nível do mar.

As inundações nas zonas costeiras representam um perigo que ameaça a vida, a dinâmica natural do ecossistema costeiro e as propriedades privadas. Rasmussen et al. (2017), fundamentados em projeções probabilísticas realizadas a partir de observações de 194 EMs, estimaram que áreas onde vivem 60 milhões de pessoas correm o risco de ficar permanentemente submersas até 2150, isto em um cenário com um aumento de 2°C na temperatura e tendo o período pré-industrial como referência.

Considerando os impactos que poderão ser sentidos pelas comunidades costeiras que dependem de recursos vindos do mar para alimentação, subsistência e um lugar seguro para viver, é importante traçar estratégias para o monitoramento nestas regiões. Para tanto, é necessária a busca pela sistematização de referenciais geodésicos consistentes e com acurácia compatível para a detecção das mudanças do planeta. Levantamentos, inventários e integração de observações geodésicas, tanto da parte terrestre quanto da parte oceânica, funcionam como ferramentas para alcançar os objetivos.

Estudos em zonas costeiras e com os objetivos de investigar e monitorar comportamentos nestas regiões vão de encontro com os objetivos da Geodésia e com as temáticas do GGOS (*Global Geodetic Observing System*). Esse, atualmente, concentra-se em quatro áreas de atuação: Unificação dos sistemas de altitudes (Tema 1); Monitoramento de riscos geológicos (Tema 2); Mudanças do nível do mar, Variabilidade espacial e previsão climática (Tema 3); e Pesquisa geodésica sobre o clima espacial (Tema 4) (GGOS, 2016).

Destaque deve ser dado a busca pela unificação dos referenciais verticais para observações geodésicas, sendo que neste artigo é enfatizada a integração de referenciais verticais na região costeira. Além disso, o estudo do comportamento dinâmico dos oceanos, com o principal objetivo de monitorar variações, análises de riscos e talvez, proporcionar conhecimento necessário para implantação de políticas de preservação em zonas costeiras. Por certo, o estudo realizado compreende duas das quatro temáticas do GGOS.

Em um contexto nacional, há uma iniciativa da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) por meio do Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima (CICVTM) que almeja a sistematização de uma metodologia para integração de referenciais verticais em região costeira objetivando uma correta avaliação de riscos de inundação em decorrência de mudanças climáticas (CONCAR, 2018). O que corrobora com a recomendação da Organização Hidrográfica Internacional (IHO - *International Hydrographic Organization*) que recomenda que o referencial vertical oceânico deve ser sempre conectado ao *Datum* de referência para obtenções de altitudes na parte terrestre (IHO, 2008).

Neste caminho, um projeto piloto tem sido desenvolvido no litoral do Estado do Rio de Janeiro, entre os municípios de Macaé e Mangaratiba. Conduzido pelo IBGE, o projeto busca estabelecer uma Rede

Geodésica de Referência Costeira (RGRC) que tem sido constituída com a elaboração e construção de marcos geodésicos robustos, realização de nivelamento geométrico em circuitos da rede, implantação de uma malha gravimétrica densa, instalações de estações GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* - Sistemas de Navegação Global por Satélite) ativas e de EMs na região. O monitoramento contínuo da crosta e do nível do mar são alguns dos objetivos almejados com o estabelecimento dessa infraestrutura geodésica, além da integração dos referenciais em regiões de costa (SOARES; SANTOS; LUZ, 2018).

Bosch (2016a) apresenta indicativos para que o Brasil siga as mesmas diretrizes do projeto *Bringing Land and Sea Together* (BLAST), que tinha como objetivo a unificação dos referenciais verticais das cartas náuticas e a conexão com o sistema de altitudes na região do Mar do Norte na Europa. Isso implica em trabalhar na determinação robusta de modelos hidrodinâmicos e de geoides de alta acurácia, o que neste momento já é visto como uma dificuldade, dado o alto custo para levantamentos de dados oceânicos e cálculo de modelos hidrodinâmicos, além da escassez de dados gravimétricos na costa brasileira. Não obstante, ainda é importante destacar que a dimensão continental do país representa uma complexidade para que os objetivos de um projeto como este seja alcançado, isto porque, a extensão da linha de costa brasileira é de 7.637 km, podendo alcançar 8.500 km se forem consideradas as baías (VITTE, 2003).

Como uma contribuição, este artigo objetiva apresentar uma temática ainda pouco explorada em um contexto nacional, propõe a apresentação de conceitos relacionados, projetos já desenvolvidos em outras regiões do mundo e alguns desafios inerentes ao Brasil para a unificação do referencial vertical oceânico e a integração dos referenciais verticais terrestre e oceânico ao longo da costa do país. Além disso, o artigo visa estimular demais pesquisadores e instituições públicas brasileiras a trabalhar com esta temática na direção de uma solução para o problema. Nos próximos tópicos serão abordados os conceitos clássicos e atuais relacionados aos referenciais verticais tanto na parte terrestre quanto oceânica e os conceitos e os desafios para a unificação dos referenciais oceânicos e a integração com o terrestre.

2 REFERENCIAIS VERTICAIS TERRESTRE E OCEÂNICO

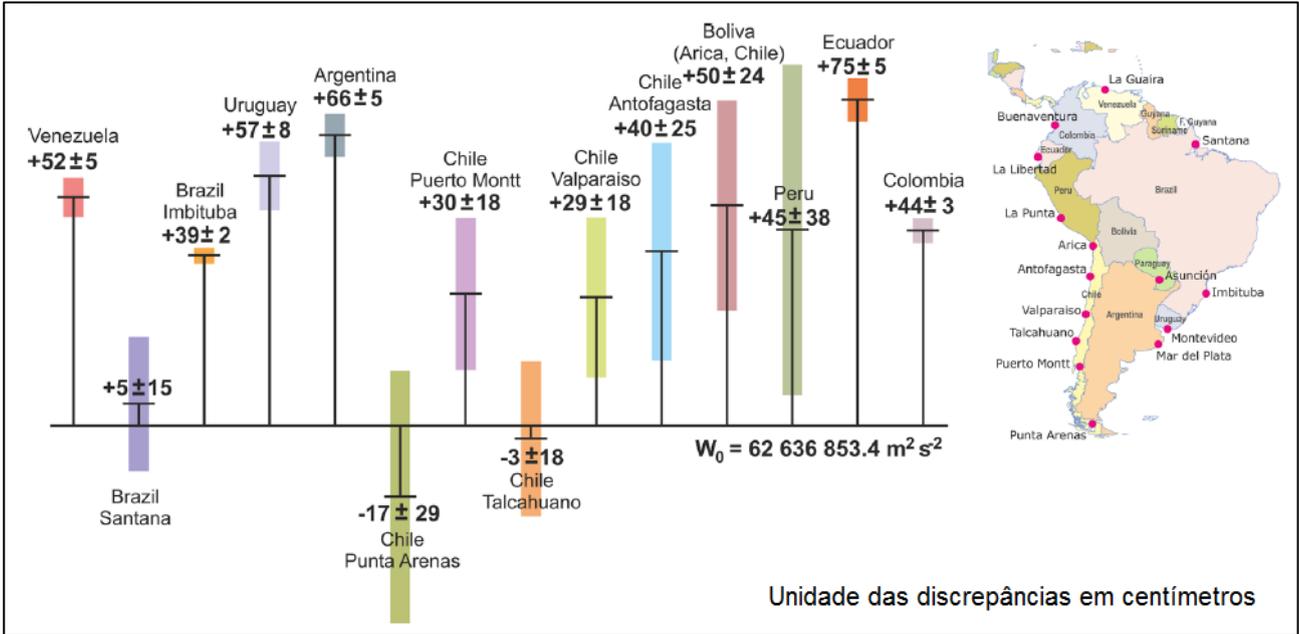
Em linhas gerais, tanto na parte terrestre quanto na parte oceânica, o conhecimento do comportamento dinâmico do nível do mar é importante para a materialização do referencial vertical. Diante disso, é essencial a caracterização dos conceitos envolvidos em cada ramo de estudo, além de apresentar as especificações clássicas e as mais aceitas na atualidade para a compreensão das temáticas em sua completude.

2.1 Conceito de *Datum* vertical terrestre: clássico (NMM) e moderno (W_0)

Em uma definição clássica, o entendimento era que as médias de observações contínuas de EMs, de um dado período de tempo, materializavam o geóide e assim eram adotados os referenciais verticais das regiões ou países, ou seja, os *Data* verticais. Para o caso do Brasil, períodos de observações maregráficas de Imbituba-SC (1949-1957) e Santana-AP (1957-1958) materializaram os dois *Data* verticais oficiais do país (LUZ, 2016). Países que não fazem fronteira com o mar, adotaram observações maregráficas de outras regiões, como é o caso da Bolívia, que utilizou observações do marégrafo de Arica (Chile) para a definição do referencial vertical terrestre.

Ao longo dos anos, a realização de conexões entre diferentes marégrafos de um mesmo país ou de países vizinhos, a vinculação entre redes verticais de diferentes países por meio de nivelamento geométrico e também a melhoria de precisão das observações geodésicas, levaram à percepção de que a materialização do *Datum* vertical a partir de observações pontuais do NMM materializava geoides distintos. Hoje, cada uma dessas materializações são conhecidas como geoides locais (W_{0i}). As estimativas mostram uma discrepância entre os *Data* brasileiros de 1,30 a 1,43 m (NICACIO; DALAZOANA, 2018). Não somente para o Brasil, mas também para os *Data* da América do Sul são vistas discrepâncias (Figura 1).

Figura 1 - Discrepâncias entre os *Data* Verticais da América do Sul e o valor convencionado de W_0 pela IAG em 2015.

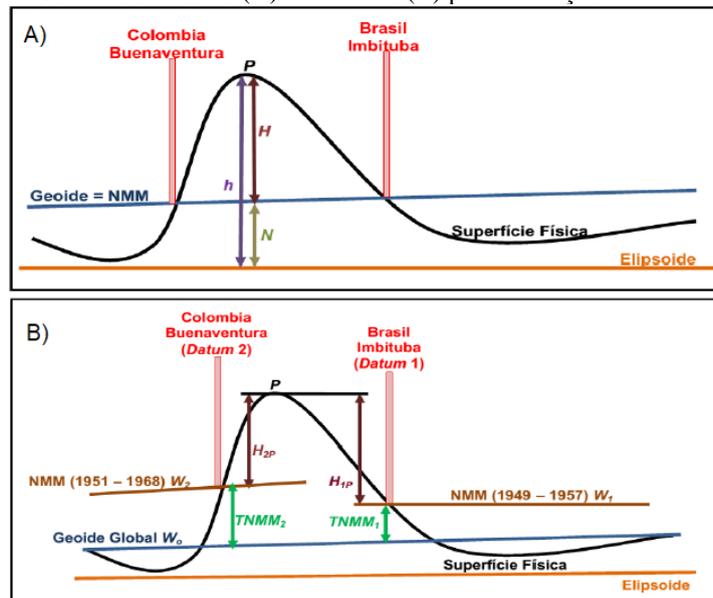


Fonte: Adaptada de SÁNCHEZ; SIDERIS (2017).

O que a definição clássica não leva em consideração é o desvio (ou diferença) existente entre o NMM local e o geóide global, denominada de TNMM (Topografia do Nível Médio do Mar). Além da TNMM, de acordo com Dalazoana (2006), há outros fatores que contribuem para as diferenças observadas entre os *Data* verticais, são eles: a evolução temporal e a espacial do nível de referência em cada *Datum* e os procedimentos metodológicos inerentes de nivelamento adotados nas diferentes redes verticais.

A Figura 2 ilustra os conceitos clássico e moderno de *Datum* altimétrico. No entendimento clássico (Figura 2A) supunha-se que duas definições de NMM materializariam o mesmo geóide (tendo que H é a altitude ortométrica, h a altitude elipsoidal e N a altitude geoidal). Porém, o NMM local como realização do *Datum* vertical não é representativo para outros períodos de tempo, nem locais, além da TNMM associada a cada definição (DALAZOANA, 2006). A condição evidenciada impossibilita trabalhos de cooperação entre países vizinhos, que necessitem de informação georreferenciada proveniente de diferentes bancos de dados e não leva a uma associação a um nível global de maneira direta. Assim, as definições distintas de NMM condicionam as discrepâncias existentes em cada definição de *Datum* vertical baseado na teoria clássica.

Figura 2 - Conceitos clássico (A) e moderno (B) para definição do *Datum* Vertical.



Fonte: DA SILVA (2017).

Em uma definição moderna (Figura 2B), o geóide é visto como uma superfície equipotencial global, com valor de geopotencial igual a W_0 em uma dada época e é tido como o *Datum* vertical global. Neste caso, os referenciais locais podem se relacionar ao referencial global por meio da TNMM.

A TNMM é definida como o afastamento entre o NMM e o geóide global, e pode variar globalmente em até ± 2 m (HECK; RUMMEL, 1990; FENOGLIO, 1996; SEEBER, 2003). A TNMM é causada pela ação de uma série de fenômenos físicos, como influências não periódicas de efeitos oceanográficos e meteorológicos, sendo também variável no tempo e por isto, é muitas vezes denominada de Topografia Dinâmica Média (MDT – *Mean Dynamic Topography*), Topografia da Superfície do Mar (SSTop - *Sea Surface Topography*) (DA SILVA, 2017), ou simplesmente, topografia oceânica. É importante ressaltar os esforços internacionais para a definição do Sistema de Referência Altimétrica Internacional (IHRIS - *International Height Reference System*) e da materialização da Rede de Referência Altimétrica Internacional (IHRF - *International Height Reference Frame*). A rede internacional possibilitará o conhecimento da TNMM ou afastamento entre as redes locais (definidas por NMMs) e o geóide global (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017).

A modelagem precisa do campo de gravidade terrestre a partir das missões espaciais, as observações do nível do mar em caráter global com os satélites altímetros e os avanços em tecnologias de processamento, levaram à padronização do valor de W_0 pela IAG em 2015. Dentre as infinitas superfícies equipotenciais com potencial W_i , para se convencionar um valor para W_0 , o geóide, é necessário levar em consideração a definição clássica de Gauss-Listing, isso para assegurar a quantificação correta da componente. Retomando à definição apresentada por Gauss (1876) e Listing (1873): “o Geóide é uma superfície equipotencial que melhor se ajusta (no sentido dos mínimos quadrados) ao NMM não perturbado em um dado instante”. De acordo com Sánchez et al. (2016), a definição dos autores pode ser atualizada para: o geóide global é dado por W_0 que é o valor do geopotencial em uma superfície de nível que melhor se aproxima (no sentido dos mínimos quadrados) à superfície do nível médio do mar global, quando totalmente calmo. O valor de W_0 convencionado para a época 2010,0 e adotado em resolução pela IAG é de $62.636.853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ com erro formal de $\pm 0,02 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (IAG, 2015; SÁNCHEZ et al., 2016).

O avanço no entendimento e a convenção do W_0 causam impactos nas redes verticais estabelecidas de forma clássica. Além da definição do *Datum*, outra questão é que muitas delas partiram do princípio de que somente a execução de nivelamento geométrico de “alta precisão” seria suficiente para uma rede consistente e estável. Assim, a concepção clássica das redes verticais gera altitudes sem caráter físico, ou seja, não vinculadas ao campo de gravidade terrestre. E isto é uma dificuldade porque o transporte de água, por conseguinte de massas no planeta, é norteadado pela ação da gravidade, e desta maneira, principalmente em muitos projetos de engenharia, o campo da gravidade não pode ser negligenciado.

Atrelado aos novos conceitos de *Data* verticais e as considerações relativas à importância do valor de gravidade associado, uma rede vertical moderna deve ter associação à modelagem do campo de gravidade e deve ser referida ao geóide global (W_0). Além disso, para redes verticais terrestres, os valores unívocos a serem utilizados são os números geopotenciais, e a partir destes, as altitudes são calculadas (DE FREITAS et al., 2018). Não obstante, para a rede vertical brasileira, o Reajustamento da Rede Altimétrica com base em Números Geopotenciais de 2018, trouxe tratativas para que o conceito moderno seja seguido, apesar do vínculo ao geóide global (W_0) ainda não ter sido alcançado (IBGE, 2018).

No contexto do SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), o grupo de trabalho que se destina a componente vertical (SIRGAS GT_III) recomenda que os países membros busquem estratégias para a realização das Redes Verticais de Referência (RVR) baseadas em números geopotenciais, o que viabilizaria a conexão das redes nacionais e um futuro ajustamento de uma RVR SIRGAS. Brasil, Argentina e Uruguai já cumpriram a tarefa e possuem as redes nacionais com ajustamento baseado em números geopotenciais (DE FREITAS et al., 2018).

2.2 Conceito de *Datum* vertical oceânico: clássico (NRED) e moderno (LAT)

Quanto ao mapeamento oceânico, especificamente, as cartas náuticas são obtidas a partir de levantamentos hidrográficos visando a coleta dos dados batimétricos nas regiões de interesse. De acordo com

a Marinha do Brasil (2019), o método tradicional de sondagem batimétrica se apresenta bastante laborioso, no qual um navio ou embarcação sonda uma determinada área ao longo de linhas contínuas, muitas vezes uniformemente espaçadas e, ao final, o resultado é a quantificação das profundidades para a representação do relevo do fundo oceânico, de reservatórios e rios, em cartas.

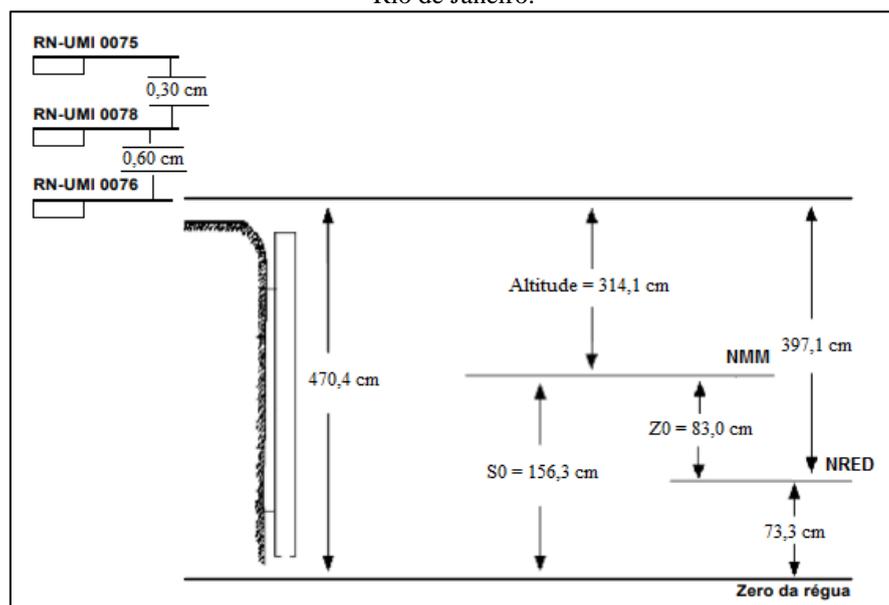
As profundidades que caracterizam o relevo oceânico são obtidas a partir de levantamentos hidrográficos e precisam estar relacionadas com os efeitos de maré local para permitir uma navegação segura (MATOS, 2005). Assim surge a necessidade de um nível de referência que seja vinculado ao fenômeno de marés, por conseguinte, que leve em consideração a dinâmica do nível do mar. Apesar dessa consideração, para a confecção de cartas náuticas não é utilizado o mesmo nível de referência adotado para as cartas terrestres.

Assim sendo, as altitudes de marés e as profundidades provenientes da sondagem batimétrica são reduzidas à um nível de referência, o *Chart Datum* (CD). Em outras palavras, o CD é o zero do eixo vertical das cartas náuticas e esse nível corresponde no Brasil ao plano de referência dado pela Média das Baixas Marés de Sizígia (MLWS - *Mean Low Water Springs*), conhecido como NR (porém, denominado neste artigo como NRED – Nível de Redução). Neste sentido, a principal ideia é tentar assegurar ao navegante que este não encontre nenhuma profundidade menor do que as representadas na carta náutica para garantir uma navegação segura (MATOS, 2005; MARINHA DO BRASIL, 2019). Porém, de acordo com Miguens (1996), o fato da determinação do NRED ser dada a partir da MLWS, por ocasião das médias das BM (Baixas Marés) de sizígia, indica que podem ser encontradas profundidades menores que as constantes na carta.

Em termos práticos, ao se ter a necessidade de confeccionar uma carta, escolhe-se um local de natureza permanente para instalar uma Referência de Nível (RN). A sua altitude é determinada por nivelamento geométrico em relação ao zero hidrográfico, em grande parte dos casos o zero hidrográfico coincide com o zero da régua maregráfica, e essa informação subsidia a determinação dos níveis de referência no local em conjunto com as análises das observações maregráficas (MATOS, 2005).

O Centro de Hidrografia da Marinha disponibiliza as descrições e diagrama de níveis de referência de cada EM ao longo da costa brasileira, todos os níveis são dados em relação a(s) RN(s) próxima(s), como por exemplo a descrição e diagrama pertencente a EM de Porto do Açu, em São João da Barra, Rio de Janeiro (Figura 3). São representados o NMM, o NRED, o zero da régua maregráfica, a RN primária, além das diferenças entre cada nível de referência representado no diagrama. A diferença entre o NMM e a RN primária é chamada de altitude, a diferença entre o NMM e o NRED é expressa por Z0 e a diferença entre o NMM e zero da régua por S0. Todas estas informações estão disponíveis nas fichas das estações maregráficas, intituladas F-41.

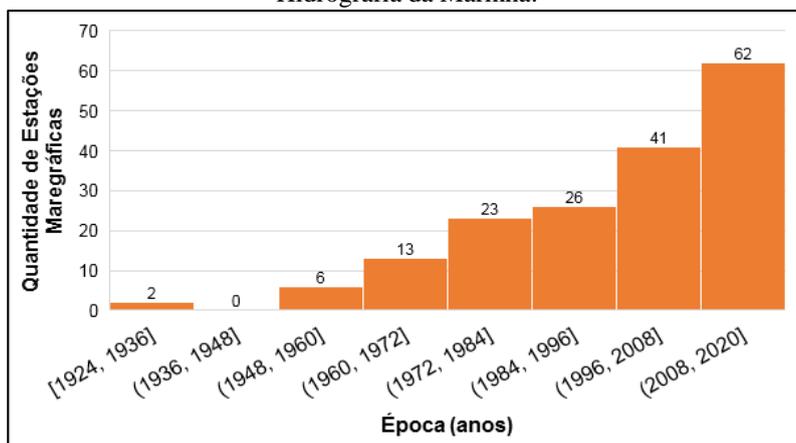
Figura 3 - Descrição e diagrama dos níveis de referência da Estação Maregráfica de Porto do Açu, São João da Barra, Rio de Janeiro.



Fonte: Adaptada de CHM (2019).

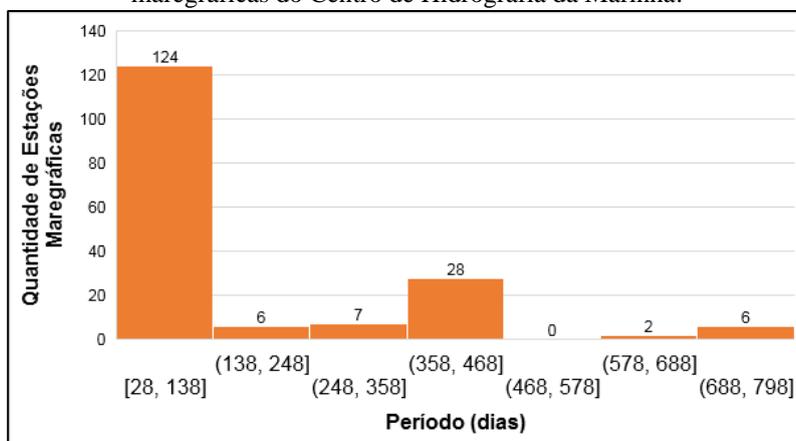
Como já mencionado, no Brasil, os NREDs das EMs disponibilizadas pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) são utilizados como *Data* verticais oceânicos ou CD, que são referências para as cartas náuticas confeccionadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Os níveis são estabelecidos ao longo da costa brasileira e foram baseados em um período de observações maregráficas. Para cada uma das EMs há um NRED associado e que foram determinados em diferentes épocas (Figura 4). A extensão do período de observação também não foi padronizada para a quantificação dos níveis ao longo da costa (Figura 5). A determinação de NREDs aumentou exponencialmente a partir de 1948 e a grande maioria deles foi determinada com até 138 dias de observações do nível do mar.

Figura 4 – Época de determinação dos níveis de referência das estações maregráficas disponibilizadas pelo Centro de Hidrografia da Marinha.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 5 – Período de observações maregráficas utilizado para a determinação dos elementos de marés das estações maregráficas do Centro de Hidrografia da Marinha.



Fonte: Os autores (2020).

Em contrapartida ao que é adotado no Brasil e também em outros países, como os Estados Unidos, a IHO recomenda que a superfície usada como referência para obtenção do *Datum* para reduções de sondagens em zonas costeiras seja definida pela Menor Maré Astronômica (LAT - *Lowest Astronomical Tide*) com o intuito de buscar uma padronização mundial (IHO, 2017). De acordo com Soares (2017), a determinação da LAT é algo que se tem almejado para a costa brasileira por meio de parcerias de diversas instituições e gerida pelo IBGE.

Adotar uma superfície de referência dada pela LAT solucionaria os problemas apresentados pela adoção dos NREDs como CD: o caráter local, o fato de que algumas profundidades podem ser menores do que as constantes na carta, a questão da determinação de cada NRED em épocas distintas, a falta de padronização da extensão das séries temporais para realização da análise harmônica visando a quantificação dos NREDs e, sobretudo, a impossibilidade de conexão ao referencial terrestre SIRGAS, isso devido ao não conhecimento de altitudes elipsoidais das RNs primárias que estão vinculadas aos NREDs. Ademais, a determinação da LAT

trará novas abordagens porque a referência vertical para profundidades não mais será dada pontualmente, mas sim por uma superfície que traria valores mínimos de marés ao longo de sua definição.

A LAT é definida como o menor nível de maré alcançado em condições meteorológicas médias (normal) e sobre diferentes combinações de condições astronômicas, com a recomendação que a determinação seja feita a partir de, pelo menos 18,6 anos, de observações da dinâmica do nível do mar, o que traria resultados confiáveis para a determinação da superfície de referência, tendo em vista que esse período mínimo compreenderia um ciclo nodal completo, sendo o ciclo nodal, o movimento periódico lunar que também é conhecido como precessão da órbita da lua (BOSCH, 2016a; BOSCH, 2016c; TURNER et al., 2010; SLOBBE; KLEES, 2012).

É importante que a LAT seja referida a um elipsoide de referência para que haja uma facilidade na integração da sondagem batimétrica com a superfície de referência vertical, especialmente porque é visto o uso cada vez mais comum de posicionamento com GNSS nos levantamentos batimétricos, o que propicia profundidades com vínculo ao modelo elipsoidal. Para o cálculo da LAT com esse requisito, é essencial a modelagem do nível do mar a partir de séries de observações que podem ser obtidas por meio de EMs, receptores GNSS, boias GNSS e Satélites Altimetros (as contribuições e especificações de cada uma dessas componentes serão abordadas em detalhes na próxima seção). Das opções citadas, somente os satélites altímetros fornecem informações com boa resolução temporal e espacial, porém uma desvantagem é que a técnica perde resolução nas proximidades das costas devido à interação oceano/continente (SLOBBE; KLEES, 2012).

3 INTEGRAÇÃO DOS REFERENCIAIS VERTICAIS EM REGIÃO COSTEIRA

3.1 Principais elementos envolvidos e desafios

O problema para integração de referenciais verticais em zonas costeiras é devido aos distintos elementos envolvidos, em particular o NMM, o geoide, a TNMM, as EMs, a altimetria por satélite, entre outros (BOSCH, 2016b). Adicionalmente, pode-se pensar nos distintos levantamentos para determinação de cotas, altitudes e profundidades: no oceano a sondagem batimétrica e na parte terrestre o nivelamento.

Em uma primeira etapa no processo de busca pela integração da componente vertical em ambiente costeiro é necessário pensar na unificação do CD a partir da obtenção da LAT. Porém, a LAT não é uma superfície obtida com observações diretas, superfícies intermediárias como o NMM e o geoide precisam ser investigadas previamente: o NMM é fundamental para a obtenção da LAT e o geoide é uma superfície que faz a conexão entre a LAT e o referencial terrestre para altitudes (SLOBBE; KLEES, 2012).

Quanto à obtenção do NMM, destaca-se que as observações das EMs combinadas com observações GNSS (WÖPPELMANN et al., 2007) e a técnica de altimetria por satélites, promovem observações essenciais. Na costa, de acordo com Bosch (2016b), as EMs representam uma indispensável interface entre a parte terrestre e a parte oceânica, pois são fixas na crosta e observam o nível do mar. Ressalta-se neste ponto, a importância do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) a partir da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) associada ao monitoramento contínuo proporcionado pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e pelos trabalhos com os circuitos do Controle Geodésico de Estações Maregráficas (CGEM). Concebida em 1996 pelo IBGE, a RMPG é hoje composta por sete estações maregráficas que registram observações contínuas ao longo da costa, todas operacionais desde a implementação, com exceção de Macaé-RJ que esteve ativa no período de 2001 a 2015, são elas: EMIMB em Imbituba-SC (desde 2001), IMBEL em Belém-PA (desde 2017), EMARC em Arraial do Cabo-RJ (desde 2017), EMSAL em Salvador-BA (desde 2004), EMFOR em Fortaleza-CE (desde 2007) e EMSAN em Santana-AP (desde 2005) (Figura 6) (IBGE, 2019).

Figura 6 – Rede Maregráfica Permanente para Geodésia.



Fonte: IBGE (2020).

No âmbito oceânico, ou seja, em mar aberto, os satélites altímetros a partir da década de 1990 possibilitaram informações da superfície dinâmica dos oceanos com boa distribuição espacial e temporal. As missões de maior destaque são Topex-Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2 e Jason-3. A técnica produz um conhecimento dos oceanos e suporta muitos estudos sobre a evolução do NMMG ao longo das últimas décadas.

Uma dificuldade é a perda de precisão da altimetria por satélites em regiões próximas à costa. A questão configura uma das grandes dificuldades para a combinação das observações geodésicas com o objetivo de integrar os referenciais. De acordo com Slobbe e Klees (2012), a perda de acurácia da técnica ocorre a uma distância de 5 a 25 km da costa, contudo, para os dados que passaram pelo procedimento de “re-tracked” a faixa é em torno de 5 a 10 km. Uma solução a esse problema é a realização de levantamentos com GNSS embarcado em boias ou barcos para modelagem do nível do mar nestas regiões (PINEAU-GUILLOU; DORST, 2012).

A altimetria por satélite observa o nível oceânico e fornece a Altitude da Superfície do Mar (SSH - *Sea Surface Height*) referida ao elipsoide. Da mesma maneira, as EMs também observam o nível do mar, porém em caráter local e muitas vezes contaminadas por movimentos da crosta. Para compatibilização das observações maregráficas, além da quantificação e correção dos movimentos da crosta e do posicionamento geocêntrico das EMs, ainda devem ser acrescidos o impacto do efeito dinâmico da interação atmosfera/oceano, o Ajustamento Glacial Isostático (GIA - *Glacial Isostatic Adjustment*) e questões climáticas devido a temperatura (SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2017).

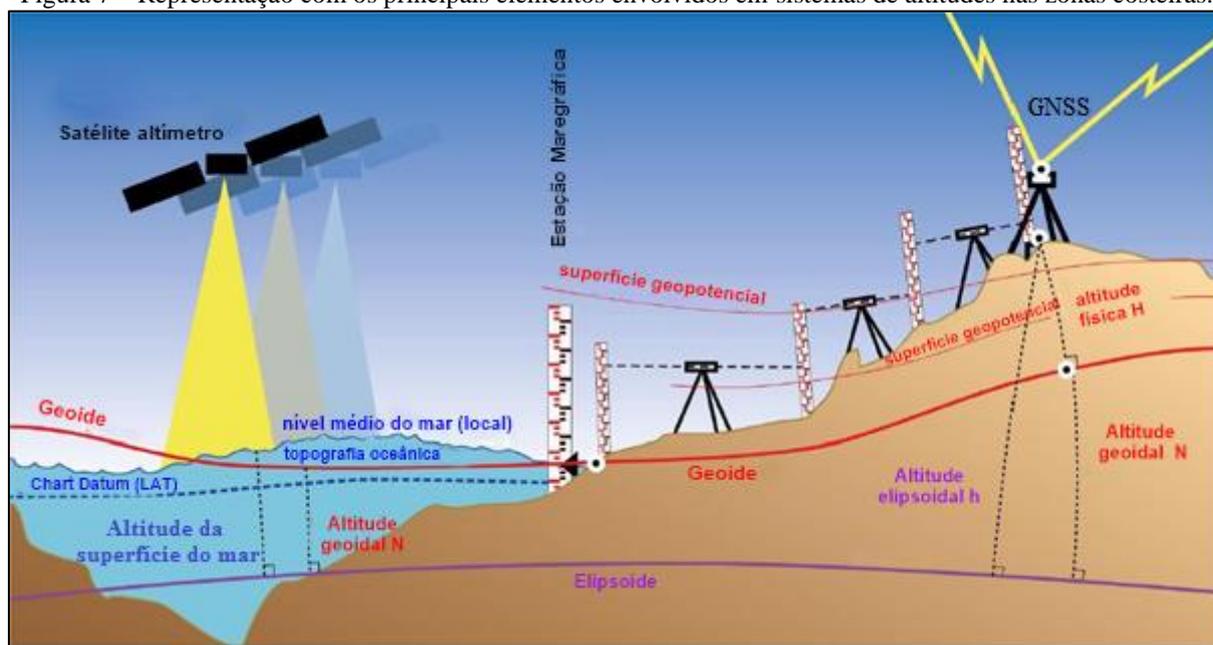
A Figura 7 apresenta um esquema conceitual dos elementos envolvidos nos sistemas de altitudes e profundidades, evidencia a complexidade para a integração e interoperabilidade das observações geodésicas em zonas costeiras, além de sintetizar as técnicas, superfícies e dificuldades devido aos diferentes níveis

envolvidos. No Brasil, os sistemas de altitudes possuem origens nos dois *Data* oficiais e ainda não foram vinculados ao geóide global (W_0), constituídos por altitudes levantadas a partir de nivelamento geométrico fundamental e com o início dos trabalhos para concepção em 1945 (LUZ, 2016; IBGE, 2017). Já as profundidades possuem origens em cada domínio ao longo da costa brasileira obtidos por observações maregráficas de EMs que muitas vezes não estão vinculadas a um elipsoide de referência, o que possibilitaria a integração com observações provenientes dos satélites altímetros. As especificações para levantamentos hidrográficos são encontradas em DHN (2017) e há níveis de referência estabelecidos a partir de 1924.

A realização de um referencial vertical oceânico a partir de uma superfície LAT requer o tratamento integrado de observações maregráficas de distintas fontes de dados em épocas convergentes. Em termos das EMs, as únicas estações que possuem confiabilidade conhecida das observações maregráficas devido ao controle geodésico aplicado, monitoramento de variações verticais crustais e também a possibilidade de vinculação das observações a um elipsoide de referência global são as que compõem a RMPG, mantida pelo IBGE. Um problema é que essas EMs ainda se apresentam em número limitado (não recobrem toda a costa brasileira) e apenas a EM de Imbituba apresenta mais que 18,6 anos de observações maregráficas.

Por outro lado, mesmo a realização do referencial vertical terrestre possui questões a serem tratadas, como por exemplo, ainda está em curso a busca por uma metodologia consistente baseada nas soluções do Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG) para a realização do IHRF, juntamente com a determinação dos vínculos das redes verticais locais ao geóide global (W_0), o que possibilitará no futuro a realização de um referencial vertical terrestre unificado (SÁNCHEZ et al., 2019).

Figura 7 – Representação com os principais elementos envolvidos em sistemas de altitudes nas zonas costeiras.



Fonte: Adaptada de BOSCH (2016c).

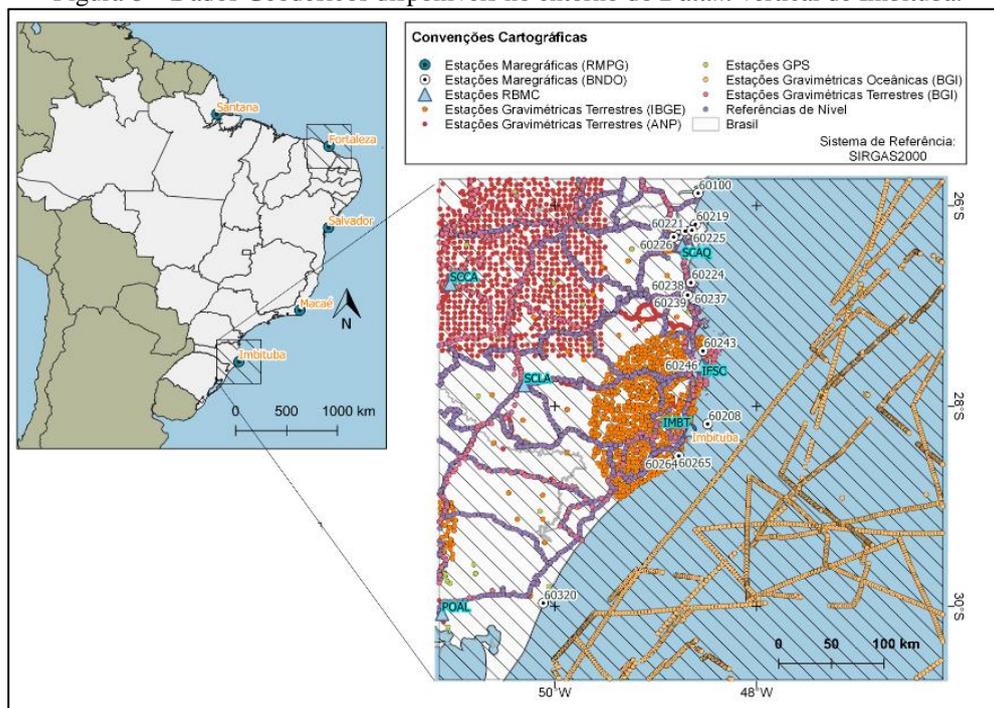
Quanto à infraestrutura geodésica disponível ao longo da costa brasileira, uma investigação foi proposta por Santana (2020). O autor, ao consultar distintos bancos de dados geodésicos e oceanográficos, nacionais e internacionais, destacou os desafios quanto a escassez de dados gravimétricos oceânicos e terrestre, a pouca quantidade de estações de monitoramento contínuo e a distribuição espacial heterogênea dos dados geodésicos e oceanográficos em zonas costeiras. Como um exemplo, para a região de Imbituba-SC, região que contém um dos *Data* verticais brasileiros, linhas contíguas da costa de 30 a 170 km apresentam um vazio de estações gravimétricas. Na mesma região, EMs do BNDO, se concentram mais ao norte do *Datum* vertical, onde há maior atividade portuária. Por fim, apenas poucas estações da RBMC são vistas localizadas em zonas costeiras (Figura 8).

A pouca quantidade de estações RBMC acarreta as dificuldades em modelar movimentos verticais nestas regiões e em quantificar valores de observações do nível do mar de maneira realista, consistente e

vinculada a um referencial geocêntrico. O estudo realizado por Montecino et al. (2017) que investigou movimentos verticais a partir da integração de observações maregráficas e de observações de satélites altímetros pode ser apontado como uma solução para suprimir a dificuldade encontrada na região costeira brasileira.

Para o preenchimento de vazios gravimétricos nas zonas costeiras, uma alternativa é a possibilidade de levantamentos aerogravimétricos na parte terrestre e oceânica, e também, essencialmente nas linhas contíguas a costa. A potencialidade positiva de observações aerogravimétricas para finalidades geodésicas foi discutida e validada por Jesus (2019). Apesar de, especificamente para a proximidade do *Datum* vertical de Imbituba, ser visualizado que as Estações Gravimétricas Terrestres se apresentam de maneira homogênea no entorno ao *Datum*, isso ocorre por esforços de diversas instituições para a densificação de informações de gravidade na região do *Datum* vertical brasileiro.

Figura 8 – Dados Geodésicos disponíveis no entorno do *Datum* vertical de Imbituba.



Fonte: Adaptada de SANTANA (2020).

3.2 Situação atual e exemplos de projetos desenvolvidos em diferentes regiões do mundo

Na Austrália, país de dimensões continentais e cercado pelos oceanos Pacífico e Índico, o Comitê Intergovernamental de Topografia e Mapeamento (ICSM - *Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping*), a partir do Grupo de Trabalho AUSHYDROID, tem buscado uma superfície que apresente a separação entre o referencial vertical para cartas náuticas e o elipsoide de referência adotado no país. A expectativa do comitê é de que seja possível a vinculação entre os levantamentos batimétricos e as observações terrestres por meio de um referencial único, além de fornecer a infraestrutura necessária para estimativas das variações do nível do mar, que por consequência, auxiliarão na mitigação de soluções para as mudanças climáticas (ICSM, 2020a). Adicionalmente, a Superfície Vertical Australiana (AVWS - *Australian Vertical Working Surface*) com acurácia de 4 a 8 cm pode ser um bom aporte para a futura vinculação ao referencial terrestre de altitudes, o geoide (ICSM, 2020b). Na atualidade, o país adota o nível de referência LAT como referencial vertical oceânico, no entanto, não como uma superfície, mas como definições locais. O aspecto positivo neste caso é que os valores pontuais de LAT possuem conexões ao *Datum* Vertical Australiano (AHD - *Australian Height Datum*).

No Canadá, o Serviço Hidrográfico Canadense tem adotado oficialmente as Marés Normais mais Baixas (LNT – *Lowest Normal Tides*) como CD. Diferente do referencial utilizado pelos Estados Unidos, que

é baseado em Médias das Mais Baixas Marés (MLLW – *Mean Lower Low Water*), as diferenças entre os dois referenciais desses países podem chegar a 1,5 m (FISHERIES AND OCEANS CANADA, 2020). O nível de referência MLLW é definido pela média das mais baixas marés a cada dia em um determinado período de tempo, no caso americano, esses valores são baseados em observações da Rede Nacional de Observação do Nível da Água (NWLON - *National Water Level Observation Network*) que é operada pelo departamento de Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*) e a época de referência é de 1983 a 2001. Para EMs com curtos períodos de observação são feitas comparações entre observações simultâneas de alguma EM de referência e, assim, os níveis de referência são definidos na época convencionada no país (NOAA, 2020a).

Ainda com relação aos Estados Unidos, algo inovador é o Programa VDatum, programa americano que integra dados de elevação, a partir da transformação entre *Data*. Em resumo, é uma ferramenta de transformação de dados batimétricos e topográficos entre diferentes níveis de referência de maré, referenciais verticais de altitudes, tais como elipsoides de referência, *Datum* vertical de altitudes do país e modelos geoidais. Os níveis de referências de marés são calculados a partir de interpolações da NWLON, que possui 210 EMs em operação com observações contínuas do nível do mar ao longo da costa americana e em grandes lagos, o que possibilita uma boa distribuição espacial das EMs (NOAA, 2020b).

No continente asiático, o Japão, como os Estados Unidos, também tem adotado níveis de referência baseados em MLLW para definição do zero vertical de cartas náuticas. Neste país, cada EM apresenta seu valor de MLLW obtido a partir das observações locais de marés (ROEBER, 2016). Já em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, os níveis de referência de marés eram geridos pelas próprias unidades portuárias locais. Em 2004, o Departamento de Mapeamento de Dubai, implantou cinco EMs que recobrem uniformemente a região costeira. O projeto contempla, ainda, um modelo geoidal com acurácia de 3 a 4 cm e o monitoramento do nível do mar a partir das EMs, além da definição do CD baseado em LAT para cada EM e o acompanhamento desse nível com relação ao referencial vertical terrestre (BAQER, 2011).

Na Europa, um dos objetivos da Rede Europeia de Observações e Dados Marinhos (EMODnet - *European Marine Observation and Data Network*) é avaliar a consistência de *Data* verticais oceânicos existentes. Nesse ponto, podem ser citados alguns projetos desenvolvidos com esta finalidade no continente europeu como o VORF (*Vertical Offshore Reference Frame*), o BathyElli (*Bathymetry referred to the Ellipsoid*) e o BLAST (*Bringing Land and Sea Together*). O principal desafio da EMODnet refere-se às várias definições, realizações e metodologias para os *Data* verticais oceânicos na Europa (ALBERTS, 2016). Apesar disso, muitos destes projetos podem servir como referência para a condução de estudos com o mesmo objetivo no Brasil. Estes mesmos projetos foram discutidos no CICVTM e apresentados em Bosch (2016a), principalmente porque são projetos que buscam cumprir com as especificações da IHO para unificação do referencial vertical oceânico e a integração dos referenciais verticais em região costeira. Devido à potencialidade da aplicação das metodologias empregadas nos distintos projetos, eles serão abordados nas sub-seções subsequentes deste artigo.

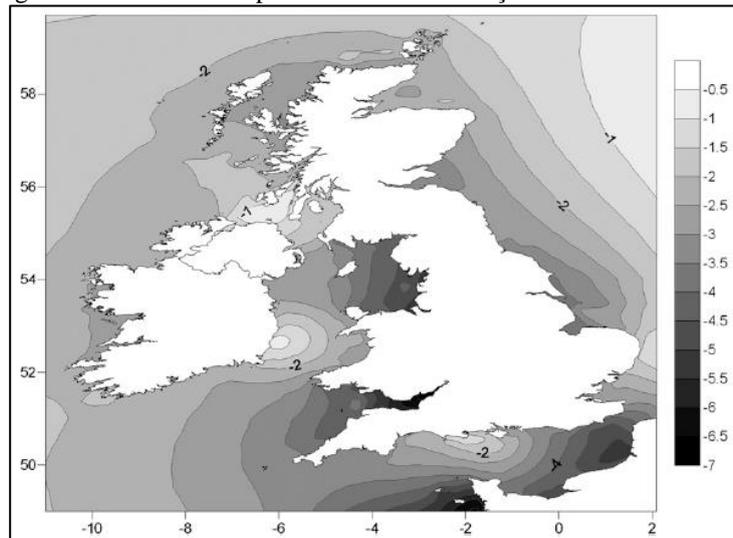
3.2.1 VERTICAL OFFSHORE REFERENCE FRAME (VORF)

A Rede de Referência Vertical Costeira (VORF - *Vertical Offshore Reference Frame*) é um projeto do Escritório Hidrográfico do Reino Unido (UKHO - *United Kingdom Hydrological Office*) que durou de 2005 a 2008, e tal como o BathyElli (assunto tratado na seção 3.2.2), objetivava a determinação da superfície LAT com relação ao NMM. O modelo LAT foi referido ao elipsoide da Rede de Referência Terrestre Europeia de 1989 (ETRF89 - *European Terrestrial Reference Frame 1989*) para possibilitar a integração entre os referenciais verticais marinho, terrestre e global. No mais, a partir de análises harmônicas foram modeladas as superfícies MLWS, Média das Preamares de sizígia (MHWS - *Mean High Water Springs*) e a Maior Maré Astronômica (HAT - *Highest Astronomical Tide*), dando maior funcionalidade à rede (TURNER et al., 2010).

Como insumo de informações da dinâmica do nível do mar para o cálculo do modelo da superfície de LAT e das demais superfícies foram utilizados dados de 700 EMs na costa e 180 EMs que foram instaladas fora da costa, modelo hidrodinâmico de 3,5 km de resolução e modelos de marés derivados de altimetria por satélite. A junção dos dados para modelagem foi feita utilizando *Thin-Plate Spline* (TPS) e ao final o projeto

teve como resultado principal o modelo da superfície LAT com relação ao NMM para a região do Reino Unido (Figura 9).

Figura 9 – Modelo da superfície LAT com relação ao NMM em metros.



Fonte: TURNER et al. (2010).

A desvantagem da metodologia empregada é que modelos globais de marés apresentam erros significativos em zonas costeiras ou em regiões de águas rasas. Assim, o uso de modelos globais de marés para geração de modelos hidrodinâmicos e conseqüentemente para geração de modelos da superfície LAT pode levar a uma estimativa incorreta (BOSCH, 2016b). Mais detalhes sobre o projeto podem ser encontrados em trabalhos de Iliffe, Ziebart e Turner (2007), Turner et al., (2010) e Turner et al., (2013).

3.2.2 BATHYMETRY REFERRED TO THE ELLIPSOID (BATHYELLI)

O projeto BathyElli foi conduzido pelo Serviço Hidrográfico e Oceanográfico da Marinha francesa (SHOM - *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*) entre os anos de 2010 e 2012. No contexto deste projeto, foram envolvidas as seguintes superfícies verticais de referência: o NMM, a LAT, o CD (conceito clássico), o elipsoide, o *Datum* de referência terrestre (IGN69 na França) e o geóide. Especificamente, foram calculadas neste projeto as superfícies NMM, LAT e CD (conceito clássico e moderno) referidas ao elipsoide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (GRS80 - *Geodetic Reference System 1980*).

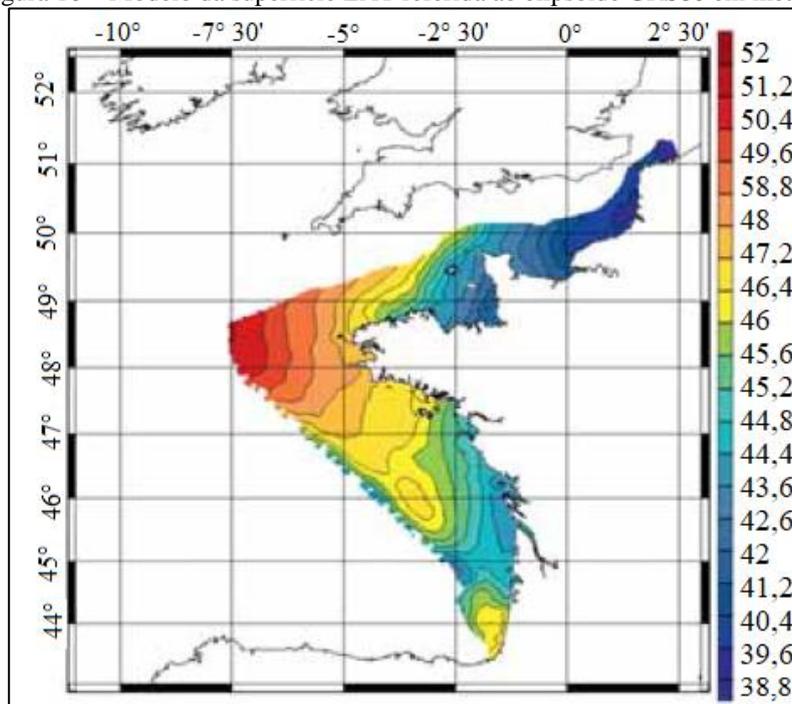
A metodologia aplicada no projeto obteve a superfície do NMM a partir da interpolação de séries temporais do nível do mar e os resultados foram mesclados utilizando o método dos mínimos quadrados com análise da função covariância. Os dados são provenientes de altimetria por satélite, EMs e dados GPS (PINEAU-GUILLOU; DORST, 2012):

- Altimetria por Satélite: obtenção do nível do mar a partir de observações fora da costa (*offshore*) entre 1992 e 2005 dos altímetros: T/P, *European Remote Sensing 1* (ERS1), *European Remote Sensing 2* (ERS2) e *GEOSAT Follow-On* (GFO). Próximo à costa não foi utilizada devido às limitações da técnica, não sendo usada em um limite de 10 milhas (aproximadamente 16 km);
- Estações Maregráficas: obtenção do nível do mar a partir de observações em locais na costa (*at the shore*) utilizando observações de 30 EMs permanentes da Rede de Observação do Nível do Mar Francesa;
- Dados GPS: para preencher o “gap” entre a altimetria por satélite e as EMs, a SHOM realizou campanhas com o GPS em modo cinemático para a mensuração do NMM em região próxima à costa (*near shore*).

A partir das observações do nível do mar, neste projeto, foi obtida a Superfície Hidrográfica Média do Mar (HMSS - *Hydrographic Mean Sea Surface*) ao invés dos modelos da Superfície Média do Mar (MSS – *Mean Sea Surface*), isso porque ela é calculada por um modelo global de maré com baixa precisão e nela é corrigido o efeito do barômetro invertido, pontos não interessantes para a hidrografia. O modelo de marés oceânicas (OTM - *Ocean Tide Model*) utilizado para a HMSS foi calculado pela SHOM e apresenta melhores resultados por ser uma solução local. Outra questão importante a ser destacada é que o NMM varia mais de 1 metro entre a costa e uma distância de até 15 milhas (aproximadamente 24 km), o que justifica isso a necessidade de preencher o “gap” na proximidade da costa (PINEAU-GUILLOU; DORST, 2012).

Em Bosch (2016b) pode ser encontrado um esquema com as etapas, os tipos de observações geodésicas, os referenciais envolvidos, as considerações feitas, locais onde foram aplicados a metodologia e as estratégias adotadas no projeto BathyElli. Mais informações sobre o projeto poderão ser encontradas em Pineau-Guillou e Dorst (2012). O principal resultado apresentado no BathyElli é a LAT referida ao elipsoide GRS80 (Figura 10).

Figura 10 – Modelo da superfície LAT referida ao elipsoide GRS80 em metros.



Fonte: PINEAU-GUILLOU; DORST (2012).

3.2.3 BRINGING LAND AND SEA TOGETHER (BLAST)

O projeto BLAST contou com a participação de 15 países europeus, foi desenvolvido entre os anos de 2009 a 2012 e liderado pelo Serviço Hidrográfico Norueguês. O projeto tinha como objetivo o desenvolvimento e a aplicação de uma metodologia para a unificação dos CD na região do Mar do Norte (*North Sea*) na Europa e a conexão entre sistemas de altitudes em região costeira com resolução espacial e precisão que atendesse às necessidades da sociedade, especialmente para o monitoramento das mudanças no planeta e gestão de riscos naturais, com precisão sub-decimétrica (BOSCH, 2016a; BOSCH, 2016b; SLOBBE; KLEES, 2012).

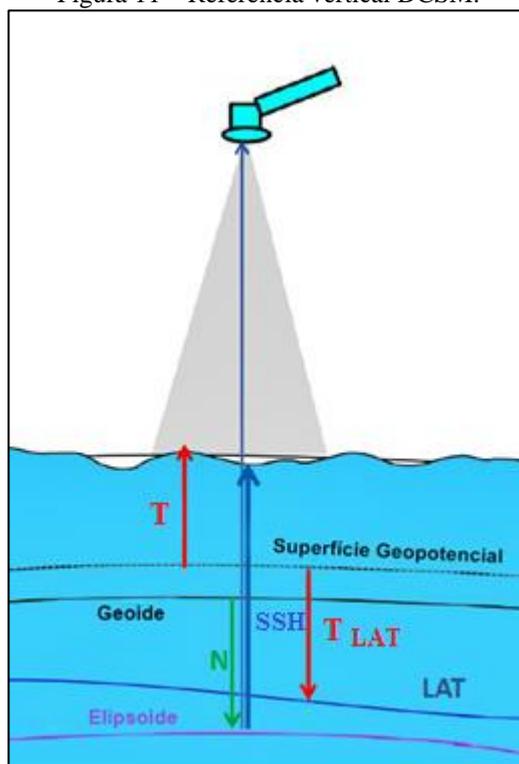
Diferente dos demais projetos, o produto gerado foi uma superfície LAT referida ao geóide ou quase-geóide, configurando uma vantagem em relação às estratégias tradicionais de se referir ao NMM. Isso porque o geóide ou quase-geóide é uma superfície mais adequada por ser possível o cálculo tanto na parte terrestre, quanto na oceânica (BOSCH, 2016a). O estabelecimento da separação da superfície LAT em relação ao geóide possibilita ainda a facilidade ao vínculo com o sistema de altitudes terrestre.

No contexto da metodologia executada, foi vista a necessidade de computação e modelagem do geóide com alta resolução e do Modelo Hidrodinâmico para Águas Rasas (SWHM - *Shallow Water Hydrodynamic*

Model). O SWHM utilizado neste projeto específico é o *Dutch Continental Shelf Model* (DCSM). O modelo é necessário para que se possa reduzir os valores de SSHs para o geóide e para que seja feita a modelagem da superfície LAT, além disso a abordagem possibilita que o inconveniente da perda de precisão da altimetria por satélite próximo à costa seja resolvido. O DCSM é referido a uma superfície equipotencial particular do campo de gravidade terrestre, podendo ser dita geópe (SLOBBE; KLEES, 2012). Mais detalhes sobre o modelo DCSM podem ser encontrados em Slobbe et al. (2013).

Em linhas gerais foi realizado o cálculo do modelo geoidal, depois foram obtidos o nível do mar instantâneo (T) e a LAT com relação ao geópe do DCSM (T_{LAT}), conforme Figura (11). De início, subtraindo dos valores de SSHs, calculados pela altimetria por satélite, a altitude geoidal (N), proveniente do modelo geoidal, são obtidos os níveis do mar instantâneos com relação ao geóide. De posse do valor de nível do mar instantâneo proveniente do DCSM (T) o valor de discrepância entre o geóide e o geópe de referência do DCSM pode ser quantificado (BOSCH, 2016b).

Figura 11 – Referência vertical DCSM.



Fonte: Adaptada de BOSCH (2016b).

Os dados utilizados em costa foram os registros do nível do mar absoluto obtidos a partir de EMs conectadas em estações GNSS ou com conexão em referências de nível (RNs). Fora da costa, o modelo DCSM e as observações de satélites altímetros foram essenciais e condicionaram a realização da superfície de referência LAT.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios principais que podem ser apontados para o Brasil recaem em como determinar uma superfície de referência LAT a fim de realizar a unificação dos NREDs na região costeira brasileira. Ademais, a infraestrutura geodésica para a determinação também é uma dificuldade dada as dimensões continentais do Brasil e devido à temporalidade das observações maregráficas. Posteriormente, tem-se questionado quais seriam as possibilidades para o estabelecimento da conexão entre a superfície de referência para determinação de profundidades oceânicas e a superfície de referência para determinação altimétrica ao longo da superfície terrestre.

Ainda com relação à infraestrutura geodésica, a necessidade de observações gravimétricas terrestres e

oceânicas em zonas costeiras brasileiras também pode ser pontuada como um destaque pela indispensabilidade do cálculo de modelos geoidais e pela busca da solução do PVCG para a integração das componentes verticais de maneira consistente e já vinculada ao referencial global para altitudes. O que neste momento, também se apresenta como um dos desafios para a materialização do IHRS no Brasil, além claro, daqueles comuns a todos os países, principalmente quanto à sistematização de uma metodologia para o cálculo da rede internacional, conforme Sánchez et al., (2019). Outro ponto crucial é a necessidade de um maior conjunto de EMs, mesmo com os esforços apresentados pelo IBGE com a concepção e manutenção da RMPG, um conjunto mais numeroso de EMs será necessário para a execução da integração das componentes verticais na costa brasileira.

Recomenda-se, sobretudo, a vinculação das observações maregráficas realizadas em nível local a um sistema geodésico de referência. A ação é essencial para que seja realizado o uso integrado das observações maregráficas, sejam elas obtidas por EMs ou por satélites altímetros. Pelas experiências de projetos de outros países apresentadas neste artigo, este é o principal caminho para a integração das componentes verticais terrestre e marinha. Essa vinculação é essencial, principalmente para as EMs mantidas pela DHN e demais instituições, já que as EMs da RMPG, que são mantidas pelo IBGE, já possuem esse vínculo, conforme IBGE (2015).

Por fim, devido às dificuldades com relação à perda de precisão da técnica de altimetria por satélite em regiões próximas à costa e o indicativo apresentado por Bosch (2016b) sobre a necessidade do cálculo de modelos hidrodinâmicos de águas rasas, os autores incentivam pesquisas científicas que tragam soluções para as regiões próximas à costa e que levem em consideração o desafio inerente ao Brasil de ser um país de dimensões continentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela concessão de bolsa de estudo no período de um ano para o primeiro autor. Sem a bolsa de estudos a concretização deste trabalho tornaria-se impossível.

Contribuição dos Autores

O autor Tulio Alves Santana foi responsável pela concepção da ideia do artigo, pela redação da minuta inicial, além da revisão e edição. A autora Regiane Dalazoana, da mesma maneira, auxiliou na concepção da ideia, na revisão e supervisão do desenvolvimento deste artigo.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ALBERTS, B. Towards a standardized European vertical datum for coastal mapping. In: EUREF 2016. San Sebastian. 25-27 May.2016.
- BAQER, M. M.; AL FALASI, E. A. A. K.; GOPI, S.; RENATI, K. S. Establishing and Updating Vertical Datum for Land and Hydrographic Surveying in Dubai Emirate. In: FIG WORKING WEEK, Marrakech, Morocco, 2011.
- BOSCH, W. European Experiences on Refinement, Connection, and Unification of Vertical Reference Surfaces in Coastal Zones. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016a. Disponível em:<https://www.concar.gov.br/temp/248@Report01final_Relat%c3%b3rio%20preliminar.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019.

- BOSCH, W. Analytical Report for Integrating Hydrodynamic and Elevation Models. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016b. Disponível em: <https://www.concar.gov.br/temp/249@Analytical-Report_2016-07-18.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019.
- BOSCH, W. Evaluating Technical Issues for Reconciling Continental Altimetry and Ocean Bathymetry. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016c. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/temp/250@CLIM0009-EvaluationReport.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2019.
- CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). **Banco Nacional de Dados Oceanográficos**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-bndo/download>>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- COLLECTE LOCALISATION SATELLITES (CLS). **SALP annual report (2017) of Mean Sea Level Activities**. 2018. Disponível em: <https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/calval/validation_report/SALP-RP-MA-EA-23189-CLS_AnnualReport_2017_MSL.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). **Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima**. 2018. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheEntidades.aspx?cod=25>>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- DA SILVA, L. M. **Análise Da Evolução Temporal Do Datum Vertical Brasileiro De Imbituba**. 2017. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2006. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- DE FREITAS, S.R.C.; MARTÍNEZ, W.; MACKERN, M. V.; CIOCE, V. J.; RODINO, R. P.; SÁNCHEZ, L. Advances in the modernization of the height reference systems in Latin America and their integration to the International Height Reference System (IHRs). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRAVITY, GEOID AND HEIGHT SYSTEMS - GRAVITY FIELD OF THE EARTH. Copenhagen, Denmark. September 12 - 21, 2018.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. 2º Revisão. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/266>>. Acesso em: 27 dez. 2019.
- FENOGLIO, L. **Sea Surface Determination with Respect to European Vertical Datums**. Dissertationen, Reihe C, Heft Nr. 464. Deutsche Geodätische Kommission, München, 1996. 118 p.
- FISHERIES AND OCEANS CANADA. **Canadian Tide and Current Tables 2020**. Ottawa, 2020. Disponível em: <http://charts.gc.ca/documents/publications/tables/2020_voll.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). **About Global Geodetic Observing System**. 2016. Disponível em: <<http://www.ggos.org/en/>>. Acesso em: 22 jul. 2019.
- HECK, B.; RUMMEL, R. Strategies for Solving the Vertical Datum Problem Using Terrestrial and Satellite Geodetic Data. In: SÜNKEL, H.; BAKER, T. (Ed.). **Sea Surface Topography and the Geoid**. International Association of Geodesy Symposia 104, 10-11 de agosto de 1989, Edinburgo, Escócia. Berlin: Springer-Verlag, 1990. p. 116-128.
- ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K.; TURNER, J. F.. A New Methodology for Incorporating Tide Gauge Data in Sea Surface Topography Models. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 30, n. 4, p.271-296, 7 nov. 2007. DOI. 10.1080/01490410701568384.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2019.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <ftp://geofpt.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <ftp://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**. 2019. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default_rmpg_int.shtm?c=10>. Acesso em: 25 jul. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 21 fev. 2020.
- INTERGOVERNMENTAL COMMITTEE ON SURVEYING AND MAPPING (ICSM). AusHydroid. Austrália. 2020a. Disponível em: <<http://www.icsm.gov.au/what-we-do/aushydroid>>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- INTERGOVERNMENTAL COMMITTEE ON SURVEYING AND MAPPING (ICSM). Australian Vertical Working Surface. Austrália. 2020b. Disponível em: <<http://www.icsm.gov.au/australian-vertical-working-surface>>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG). **Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHR)**. München, Alemanha, 2015. Disponível em: <https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Resolution 3/1919, as amended – Draft Proposal**. 2008. Disponível em: <https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/TWCWG1/TWCWG1-7.1.2b-Resolution_3-1919-Clean.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Regulations of the IHO for International (INT) charts and chart specifications of the IHO**. 2017. Disponível em: <https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-4/S-4%20Ed%204.7.0%20July%202017%20EN.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019.
- JESUS, R. M. L. **Potencialidade do uso, para aplicações geodésicas, de levantamentos aero geofísicos nos estados do Pará e Amapá**. 2019. 172 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- 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**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 1, p.79-97, jun. 2016.
- MARINHA DO BRASIL. Centro de Hidrografia da Marinha. **Sondagem Batimétrica**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica>>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- MATOS, A. C. O. C. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- MCGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. **Environment And Urbanization**, [S.l.], v. 19, n. 1,

p.17-37, abr. 2007. DOI. 10.1177/0956247807076960.

- MIGUENS, A. P. Marés e correntes de maré; correntes oceânicas. In: **Navegação: a ciência e a arte – navegação costeira, estimada e em águas restritas**. Niterói: DHN-Marinha do Brasil, 1996.
- MONTECINO, H. D. C.; FERREIRA, V. G.; CUEVAS, A.; CABRERA, L. C.; SOTO, J. C.; DE FREITAS, S. R. C. Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges. **International Journal Of Remote Sensing**, [s.l.], v. 38, n. 24, p.7551-7565, 14 fev. 2017. DOI. 10.1080/01431161.2017.1288306.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Mapping and Charting**. 2020a. Disponível em: < <https://tidesandcurrents.noaa.gov/mapping.html> >. Acesso em: 25 jul. 2019.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Vertical Datum Transformation Integrating America's Elevation Data**. 2020b. Disponível em: < <https://vdatum.noaa.gov/welcome.html> >. Acesso em: 26 jul. 2019.
- NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, NICHOLLS, R. J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. **Plos One**, [S.l.], v. 10, n. 3, p.1-34, 11 mar. 2015. DOI. 10.1371/journal.pone.0118571.
- NICACIO, E.; DALAZOANA, R. A New Estimate for Brazilian Vertical *Data* Offset Based on Global Geopotential Models and Height Determinations Through Relative Approach. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 24, n. 3, p.335-350, ago. 2018b. DOI. 10.1590/s1982-21702018000300022.
- PINEAU-GUILLOU, L.; DORST, L. Creation of Vertical Reference Surfaces at Sea Using Altimetry and GPS. In: ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X. **Reference Frames for Applications in Geosciences**. v. 138, 2012. p.229-235. DOI. 10.1007/978-3-642-32998-2.
- RASMUSSEN, D. J.; BITTERMANN, K; BUCHANAN, M. K.; KULP, S.; STRAUSS, B. H.; KOPP, R. E.; OPPENHEIMER, M. Extreme sea level implications of 1.5 °C, 2.0 °C, and 2.5 °C temperature stabilization targets in the 21st and 22nd centuries. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v. 13, n. 3, p.1-42, 1 mar. 2017. DOI. 10.1088/1748-9326/aaac87.
- ROEBER, V. **Tidal Records in Sendai, Miyagi, JAPAN, & observations of the Fukushima-oki tsunami signal**. Sendai. 2016. Disponível em <https://irides.tohoku.ac.jp/media/files/archive/tidal_records_sendai_fukushima-tsunami_2016_roeber.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2020.
- SÁNCHEZ, L.; CUNDERLÍK, R.; DAYOUB, N.; MIKULA, K.; MINARECHOVÁ, Z.; SÍMA, Z.; VATRT, V. VOJTÍSKOVÁ, M. A conventional value for the geoid reference potential W_0 . **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 90, n. 9, p.815-835, 23 maio 2016. DOI.10.1007/s00190-016-0913-x.
- SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. Vertical *datum* unification for the International Height Reference System (IHRs). **Geophysical Journal International**, [s.l.], p.570-586, 21 jan. 2017. DOI. 10.1093/gji/ggx025.
- SÁNCHEZ, L.; AGREN, J.; HUANG, J.; MAKINEN, J.; DENKER, H; IHDE, J.; ABD-ELMOTAAL, H.; AHLGREN, K.; AMOS, M.; BARZAGHI, R.; BAŠIĆ, T.; BLITZKOW, D.; CARRION, D.; CLAESSENS, S.; EROL, B.; EROL, S.; FILMER, M.; FORSBERG, R.; GRIGORIADIS, V. N.; SERKAN IŞIK, M.; JIANG, T.; LI, X.; LIU, Q.; MATOS, A.C.O.C.; MATSUO, K.; NOVÁK, P.; PAIL, R.; PITOŇÁK, M.; ROMAN, D.; SCHMITD, M.; SIDERIS, M.; VARGA, M.; VERGOS, G. S.; VÉRONNEAU, M.; WILLBERG, M.; ZHANG, C.; ZINGERLE, P. Advances in the realisation of the International Height Reference System. In: SYMPOSIUM SIRGAS2019. Rio de Janeiro, Brasil. Novembro, 11 - 14, 2019.
- SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; GRAVELLE, M.; DANGENDORF, S. MARCOS, M.; SPADA, G.; WOPPELMANN, G. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. **Earth And Planetary Science Letters**, [s.l.], v. 473, p.24-32, set. 2017. DOI. 10.1016/j.epsl.2017.05.038.
- SANTANA, T. A. **Contribuições para os Estudos de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marinha ao Longo da Costa Brasileira**. 2020. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

- SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2nd completely rev. and extended ed Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2003. xix, 589 p.
- SLOBBE, D. C.; KLEES, R. **Establishing a consistent vertical reference frame for the North Sea area**. Relatório. ago. 2012. Disponível em: < <http://blast-project.eu/media.php?file=623> >. Acesso em: 25 jul. 2019.
- SLOBBE, D.C.; VERLAAN, M.; KLEES, R.; GERRITSEN, H. Obtaining instantaneous water levels relative to a geoid with a 2D storm surge model. **Continental Shelf Research**, [s.l.], v. 52, p.172-189, jan. 2013. DOI. 10.1016/j.csr.2012.10.002.
- SOARES, S. Rede Geodésica de Referência Costeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. Rio de Janeiro, Brasil. 2017.
- SOARES, S.; SANTOS, E. G. LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como Insumo para Integração de Altitudes e Profundidades: Resultados Preliminares. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2018, Recife. **Anais...** Curitiba: UFPE Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, p. 742-751, 2018. Disponível em: < <https://www.ufpe.br/decart> >. Acesso em: 22 jul. 2019.
- TURNER, J. F.; ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K. WILSON, C.; HORSBURGH, J. Interpolation of Tidal Levels in the Coastal Zone for the Creation of a Hydrographic *Datum*. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [s.l.], v. 27, n. 3, p.605-613, mar. 2010. DOI. 10.1175/2009jtecho645.1.
- TURNER, J. F.; ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K.; JONES, C. Global Ocean Tide Models: Assessment and Use within a Surface Model of Lowest Astronomical Tide. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.123-137, jan. 2013. DOI. 10.1080/01490419.2013.771717.
- VITTE, A.C. O litoral brasileiro: a valorização do espaço e os riscos socioambientais. **Territorium-Revista de Geografia Física aplicada no reordenamento do território e gestão de recursos naturais**, [s.l.], v. 10, p.61-67, 2003.
- WÖPPELMANN, G.; MIGUEZ, B. M.; BOUIN, M. N.; ALTAMIMI, Z. Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. **Global And Planetary Change**, [s.l.], v. 57, n. 3-4, p.396-406, jun. 2007. DOI. 10.1016/j.gloplacha.2007.02.002.

Biografia do autor principal



Tulio Alves Santana nasceu em Paracatu, no noroeste mineiro, em 1995. Cursou Engenharia de Agrimensura e Cartográfica na Universidade Federal de Uberlândia, campus Monte Carmelo (UFU/MC) (2013-2017). Fez mestrado acadêmico em Ciências Geodésicas na Universidade Federal do Paraná em Curitiba (2018-2020). Atualmente é Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo na UFU/MC (Desde 2019). Tem interesse nos seguintes temas: Integração dos referenciais verticais em zonas costeiras; Sistemas de monitoramento do planeta Terra; Referenciais Verticais; Integração de dados de Altimetria por satélite com dados maregráficos; Monitoramento do nível do mar; Modelagem do geopotencial; Conexão de *data* verticais; e Rede de Referência Altimétrica Internacional.



Esta obra está licenciado com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.