

Estudo da obtenção do nível médio do mar com altimetria por satélites

RESUMO

A forma atribuída à Terra, por convenção, é a do geoide. Este é considerado como a superfície equipotencial que coincide com o Nível Médio dos Mares (NMM) não perturbado. É de fundamental importância aos geodestas a determinação do NMM (*Data* altimétricos), uma vez que estes apresentam papel importante na realização de sistemas globais de referência e permitem a integração de dados referidos a redes verticais clássicas, onde cada *Datum* é definido pelo NMM. Atualmente a Altimetria por Satélites (ALTSAT) é uma técnica eficaz no monitoramento do NMM, uma vez que proporciona uma obtenção metódica e contínua de dados e que por seu turno permite a observação global do Nível do Mar (NM). Resultando em uma estrutura de dados com diversos parâmetros oceanográficos e em séries temporais de dados consistentes por longos períodos. Isso facilita sobremaneira a utilização destes dados para os estudos do NMM e, conseqüentemente, a determinação da Topografia do Nível Médio dos Mares (TNMM) e do próprio geoide. O presente trabalho está centrado no estudo da obtenção do NMM obtido pelas missões altimétricas, com ênfase nos satélites TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e Jason-3 visando à importância do NMM para a determinação da TNMM.

PALAVRAS-CHAVE: Geoide. NMM. TNMM. Altimetria por Satélites.

Vania Pereira Reis

vania_reis@ymail.com
orcid.org/0000-0002-4429-7972
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Alessandra Svonka Palmeiro

aspalmeiro@yahoo.com.br
orcid.org/0000-0003-2575-6720
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Luiz Guimarães Barbosa

luizgbarbosa@gmail.com
orcid.org/0000-0001-8958-9023
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

INTRODUÇÃO

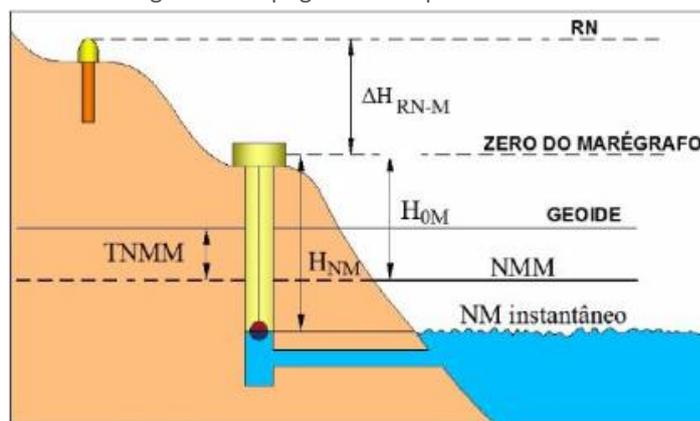
Segundo o conceito introduzido pelo matemático alemão CARL FRIEDRICH GAUSS (1777-1855), a forma do planeta Terra, é o GEOIDE, que corresponde à superfície do Nível Médio do Mar homogêneo (ausência de correntezas, ventos, variação da densidade da água, etc.) supostamente prolongado por sob os continentes (IBGE, 2004).

De acordo com Escobar e Silveira (2001), a materialização do geóide pode ser feita na costa oceânica, através do registro das variações do NM. Estas variações são medidas com marégrafos e os pontos de medições devem ser feitos em locais adequados e por um determinado intervalo de tempo. O nível médio obtido após grandes intervalos de tempo, pelo menos um ciclo de nutação (aproximadamente 18,6 anos) é considerado como uma aproximação do geóide.

Um estudo sobre a comparação de um geóide determinado com dados gravimétricos e o NMM do *Datum Vertical Brasileiro* (DVB), o qual foi determinado com dados do marégrafo de Imbituba-SC, mostrou diferenças que são em grande parte, causadas por mudanças das características oceanográficas (salinidade, temperatura, densidade e pressão) ao longo da costa (LOPES, 2006).

Segundo Escobar e Silveira (2001) as variações periódicas do NM são, em sua maior parte, eliminadas pela adoção do nível médio. Todavia, influências não periódicas, tais como algumas componentes da maré e efeitos oceanográficos e meteorológicos aproximadamente constantes, afetam o valor médio. Portanto, o valor médio do NM não é rigorosamente coincidente com o geóide. O afastamento entre a superfície do NMM e o geóide é chamado de Topografia do Nível Médio do Mar – TNMM, como se pode observar na Figura 1, e pode atingir valores superiores a 1 metro.

Figura 1 – Topografia da superfície do mar



Fonte: Adaptado de Escobar e Silveira (2001).

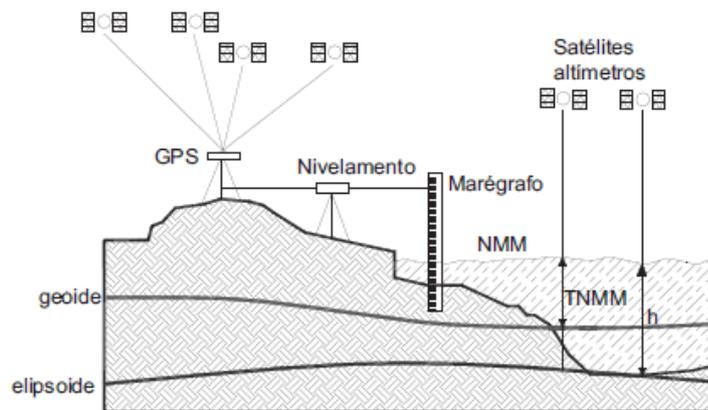
Segundo Peixoto (2007) nos últimos 20 anos, com o avanço da era espacial, novos instrumentos de estudo oceanográfico foram desenvolvidos, com o propósito de melhorar ou complementar as antigas medições pontuais realizadas por instrumentos na costa a partir do século XVIII. Em se tratando de estudo do NM, antes dos satélites altimétricos, eram usados principalmente marégrafos na costa e expedições com medidores do NM por pressão em regiões pelágicas, além também do uso de modelos numéricos de simulação. Em 1990 a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) - EUA, em conjunto com o CNES

(*Centre National d'Études Spatiales*) - França, iniciaram o programa de estudos em oceanografia por satélite, utilizando em seus primeiros projetos os satélites GEOSAT (*Geodetic Satellite*) e ERS (*European Research Satellite*).

De acordo com Silva (2010) a partir do início dos anos 90, duas grandes famílias de satélites altimétricos foram desenvolvidas. A primeira, desenvolvida conjuntamente pelo CNES e pela NASA, embarcadas nos satélites TOPEX/Poseidon (1992-2006) e seus sucessores Jason-1 (2001) e Jason-2 (2008), especificamente ao estudo dos oceanos. Esses satélites possuem, além de uma cobertura global, uma repetitividade regular, possibilitando elaborar mapas topográficos da superfície oceânica, bem como acompanhar sua evolução (CNES, 2016). Assim as observações dos satélites possibilitam a análise das variações do NM e o estudo de suas causas, como por exemplo, a circulação oceânica, efeitos meteorológicos, influências geofísicas, etc. (LOPES et al., 2008).

De acordo com Silva et al. (2013) a determinação do NMM pode ser realizada a partir de séries temporais de dados do nível d'água obtidos, por exemplo, da ALTSAT parametrizada por outras observações geodésicas na região de interesse. Logo, tal superfície associada com uma referência do geóide global permite a determinação da TNMM na região de interesse (Figura 2).

Figura 2 – Topografia da superfície do mar através de satélite altímetro



Fonte: Adaptado de Bosch (2006).

De acordo com Escobar e Silveira (2001) desde a era SKYLAB (*Sky Laboratory*) até agora, programas como SEASAT, GEOSAT, ERS-1, TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e, mais recentemente, o Jason-3 lançado em 17/01/2016, têm sido aprimorados, visando à melhora da precisão e uma maior cobertura espacial das medidas altimétricas, com reflexos favoráveis na exatidão e resolução dos modelos da superfície oceânica média, além do conhecimento da TNMM.

Quando se fala de ALTSAT, é necessário que se tenha em mente os erros inerentes ao próprio processo de geração dessa massa de dados. Pode-se citar atrasos pela ionosfera e troposfera, correção do estado do mar, erros na órbita, nos modelos de maré oceânica, variação do relógio do altímetro e variação da calibração eletrônica do altímetro (ESCOBAR e SILVEIRA, 2001).

Contudo, com os satélites TOPEX/Poseidon e Jason a determinação do NM alcançou uma precisão sem precedentes, em escalas espaciais horizontais de centenas a milhares de km e temporais de poucos dias a vários anos (LOPES et al., 2008).

Dessa forma, o presente trabalho está centrado no estudo sobre a obtenção do NMM pelas missões altimétricas, com ênfase nas missões TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, e mais recentemente o Jason-3, buscando salientar a importância do NMM para a determinação da TNMM. Têm-se ainda como objetivos, realizar uma revisão teórica sobre o NMM no contexto da Geodésia; realizar um estudo sobre o princípio da ALTSAT; realizar uma revisão teórica sobre as missões TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e Jason-3; demonstrar o procedimento de medições por satélites altímetros, bem como sua importância atual na solução de alguns problemas clássicos em aplicações geodésicas.

A definição clássica de *Datum* Vertical - DV pressupõe que o geoide coincide com o NMM estabelecido por observações maregráficas durante determinado período. Assim, como o DV depende do NMM, é necessário definir quanto uma superfície equipotencial a ele associada difere do geoide adotado como referência global, descrito por um valor do geopotencial (W_0) relativamente ao qual será determinado o seu valor (W_i) no DV, com o auxílio de modelos geopotenciais como os derivados de missões gravimétricas espaciais. Do ponto de vista puramente geométrico, a TNMM pode ser descrita a partir da altitude do NMM, referido ao elipsoide, e da altura geoidal (N) (FREITAS et al., 2007).

De acordo com Polito e Sato (2003) nos últimos anos devido ao advento da era espacial, geodestas do mundo inteiro têm intensificado os estudos sobre o NMM com dados de ALTSAT, uma vez que “a obtenção metódica e contínua de dados é uma das maiores razões do sucesso da oceanografia por satélites”. Essa técnica oferece uma grande quantidade de dados oceanográficos, facilitando o estudo sobre o NMM e fenômenos a ele relacionados.

A contribuição deste trabalho é a de mostrar a metodologia para a obtenção do NMM através da altimetria por satélites, buscando apresentar o procedimento de obtenção do nível do mar e do NMM pelas missões.

GEOIDE

A forma atribuída à Terra, por convenção, é a do geoide. Superfície entendida até o momento como sendo materializada pela superfície equipotencial que coincide com o nível médio não perturbado dos mares (BLITZKOW et al., 2004).

Segundo Torge (1980) o geoide é uma superfície que possui caráter físico, enquanto o elipsoide é uma superfície que não tem significado físico, possui apenas características geométricas.

De acordo com Palmeiro (2011) visando à definição de um geoide global, Heck e Rummel (1990) destacaram que não existe uma única definição para o geoide global. Assim a escolha de uma superfície equipotencial quase estacionária do campo da gravidade, próxima do NMM pode ser adotada segundo diferentes critérios conforme a aplicação.

NÍVEL MÉDIO DO MAR

Mesmo antes do surgimento do conceito de geoide, o NMM assim obtido já era adotado como superfície de referência para as altitudes (LUZ et al., 2008).

CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS E O NMM

A temperatura, a salinidade e a descarga dos rios estão diretamente ligadas à densidade da água do oceano, que influencia diretamente o NM (CARLSSON, 1998). O NM aumenta com o decréscimo da densidade, o que foi verificado por Lisitzin (1974) no mar Báltico.

A temperatura influencia indiretamente a densidade da água por meio da precipitação e evaporação, que contribuem para a diminuição e o aumento da salinidade, respectivamente. A salinidade superficial geralmente é maior nas zonas tropicais (cerca de 36 gramas de sal/1000 ml de água), ou seja 3,6 %, devido à evaporação que excede a precipitação. A densidade da água é diretamente proporcional à dissolução de sais. Assim, a salinidade junto à costa apresenta valores menores, comparados ao resto do oceano, devido à descarga de água doce dos rios (PICKARD, 1974).

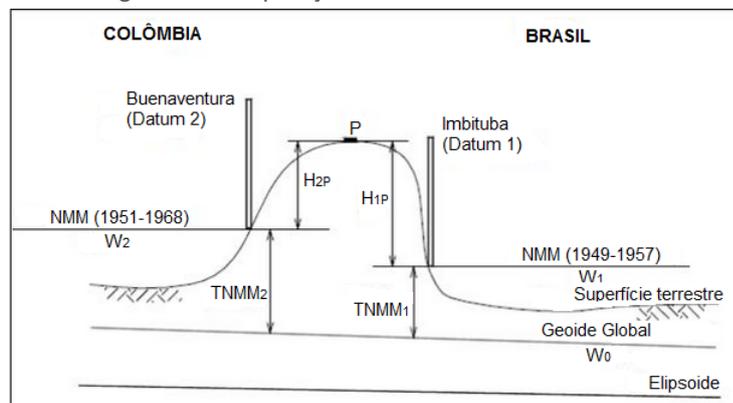
A descarga de rios pode alterar o NMM em vários decímetros, dependendo da localização e do volume de água doce descarregada no mar (VANICEK e KRAKIWSKY, 1986).

Segundo Dalazoana et al. (2005) as diferenças de altitude encontradas entre redes verticais de países vizinhos têm duas causas principais: a primeira relaciona-se com os erros intrínsecos às operações de nivelamento (erros instrumentais, operacionais e principalmente erros causados pela não consideração dos efeitos devidos à gravidade). A segunda causa relaciona-se a definição do nível de referência de cada país (geralmente o NMM) e suas variações temporais e espaciais.

Segundo Lopes (2006) com o avanço das técnicas espaciais, houve uma evolução no conceito de *Data* geodésicos; entretanto, a realização de um *Datum* Vertical Global - DVG ainda não foi totalmente solucionada, por envolver grandezas que variam no espaço e no tempo.

A TNMM é uma das principais causas da diferença entre o NMM em diferentes locais, e da incompatibilidade dos DVs a eles associados, como mostrado na Figura 4. Cada DV é referido a uma superfície equipotencial particular (com potencial W_i) associada ao NMM no marégrafo numa determinada época, a qual geralmente não coincide com o geóide global (com potencial W_0) (DALAZOANA, 2005).

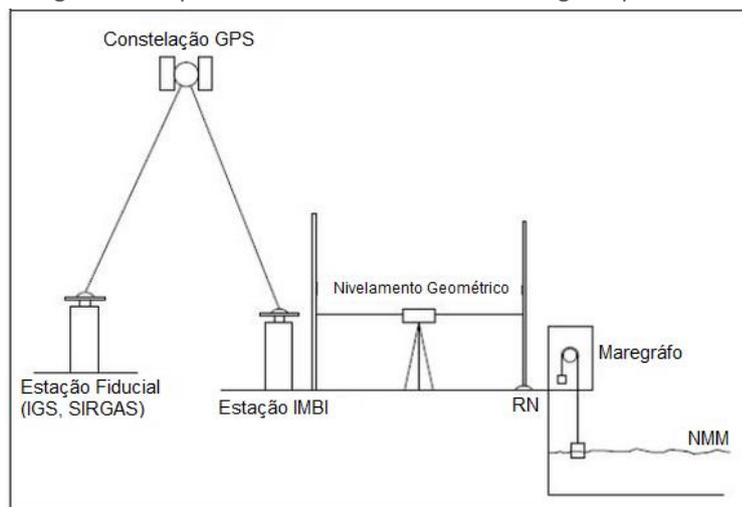
Figura 4 – Comparação DV do Brasil x DV Colômbia



Fonte: Dalazoana (2005).

Outro ponto relevante que deve ser considerado é a posição geocêntrica do DV que de acordo com Dalazoana et al. (2005) o posicionamento por *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de uma estação localizada nas proximidades do marégrafo, e a realização do nivelamento geométrico entre esta estação e o marégrafo permitem vincular as observações maregráficas a um sistema geodésico de referência geocêntrico, como ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Esquema do monitoramento do marégrafo por GNSS



Fonte: Adaptado de IOC (2002).

De acordo com Cazenave (1999, p.458); e Cazenave et al. (2003, p.25) existem três problemas relacionados com o uso de dados provenientes de marégrafos: o primeiro é a pobre distribuição geográfica de marégrafos com longo período de observações; o segundo deve-se ao fato da série temporal de dados não ser contínua pois provêm de diferentes equipamentos ao longo do tempo; o terceiro é o de que o marégrafo mede o NM com relação à estrutura na qual se encontra instalado, ou seja, as observações podem estar contaminadas por movimentos da crosta ou por alterações estruturais locais, que estariam sendo assumidas como variações do nível absoluto do mar. Assim, o estudo de variações temporais do NM depende também do conhecimento acerca das deformações da crosta terrestre, em especial dos movimentos verticais e de como estes movimentos afetam as observações maregráficas (DALAZOANA, 2005).

Assim o monitoramento periódico da posição geocêntrica da estação possibilita estimar eventuais movimentos verticais da crosta e evitar que os mesmos sejam interpretados como variações do NM.

Segundo Dalazoana et al. (2005) uma vez monitoradas variações crustais e do NM, é possível estimar as variações absolutas do NMM. O conhecimento da posição geocêntrica do marégrafo possibilita, também, que o NM seja relacionado ao mesmo sistema de referência utilizado pela ALTSAT, proporcionando a calibração absoluta dos altímetros e a comparação direta entre as séries temporais de dados maregráficos e dados provenientes dos sensores altímetros.

ALTIMETRIA POR SATÉLITES

Os satélites altímetros foram desenvolvidos a partir da década de 60 sendo sua principal vantagem a de que os radares altímetros permitem mensurações da forma da superfície dos oceanos globalmente e frequentemente (PALMEIRO, 2011).

Segundo Dalazoana et al. (2005) a ALTSAT é uma técnica de sensoriamento remoto com importantes aplicações em Geodésia, Oceanografia e áreas correlatas, uma vez que proporciona uma obtenção metódica e contínua de dados e que por seu turno permite a observação global do NM. Assim tem sido uma técnica eficaz no monitoramento da superfície do mar. De acordo com Silva (2010) os satélites multiplicam-se e diversificam-se, fornecendo, assim, o acesso a dados digitais em grande quantidade.

FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DO SATÉLITE ALTÍMETRO

Essa técnica utiliza um satélite como plataforma para um sensor (chamado de radar altímetro) que transmite, à superfície terrestre, pulsos de energia na frequência das micro-ondas e recebe o sinal de retorno após ser refletido pela superfície (DALAZOANA, 2005).

Polito e Sato (2003) explicam detalhadamente que o altímetro é um instrumento ativo que emite pulsos na banda de radar. Este pulso sofre reflexão aproximadamente especular na superfície do oceano e parte de sua energia volta à antena do satélite após um tempo Δt . Como sabe-se a velocidade c da luz pode-se determinar a distância $d = c \cdot \Delta t$ entre o altímetro e a superfície do mar.

MEDIDA ALTIMÉTRICA POR SATÉLITE ALTÍMETRO

O radar altímetro do satélite transmite sinais permanentes com alta frequência à Terra e recebe o eco da superfície do mar. Este sinal é analisado para resultar em uma medição do caminho percorrido pelo sinal, utilizando-se de cálculos que geram uma medição precisa da distância entre o satélite e a Terra (PEIXOTO, 2007).

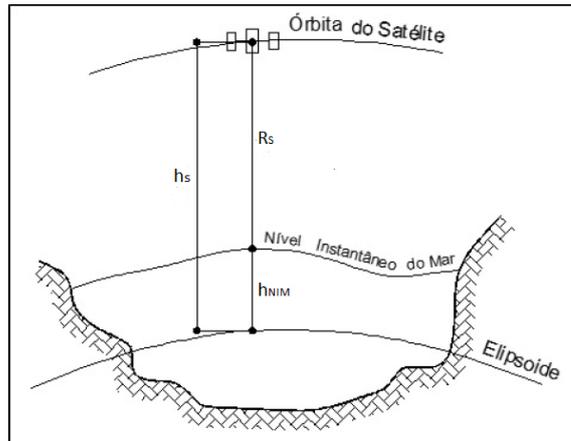
De acordo com Chelton et al. (2001); Seeber (2003) a altitude (R_S) (Equação 1) do satélite (Figura 6) sobre a superfície instantânea do mar pode ser estimada a partir do tempo de percurso do sinal emitido pelo radar (Δt):

$$R_S = c - \left(\frac{\Delta t}{2}\right). \quad (1)$$

onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo. Uma vez que a órbita do satélite é conhecida, a altitude do satélite sobre um elipsoide de referência (h_S) também é conhecida, pode-se então determinar a altitude da superfície instantânea do mar em relação ao elipsoide de referência (h_{NIM}), pela Equação 2:

$$h_{NIM} = h_S - R_S. \quad (2)$$

Figura 6 – Princípio simplificado da altimetria por satélites

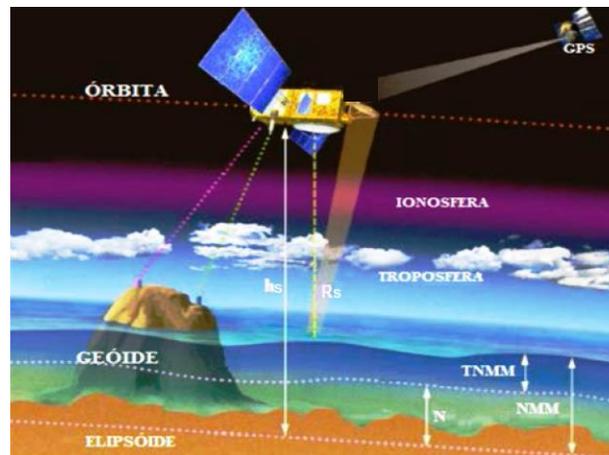


Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Porém, ao passar pela atmosfera, o sinal eletromagnético sofre refração devido principalmente ao vapor de água e ionização, fenômenos que precisam ser corrigidos para se obter uma medida com precisão em torno de 2 cm, necessária para estudos da dinâmica dos oceanos (PEIXOTO, 2007).

Tanto h_s quanto R_s contêm erros; logo a conversão das medidas do altímetro em altitudes da superfície do mar (*Sea Surface Heights - SSH*) requer uma série de correções, como por exemplo: influências instrumentais e atmosféricas (Figura 7), correções das órbitas dos satélites altímetros, entre outras (SEEBER, 2003).

Figura 7 – Influências atmosféricas sobre os satélites altímetros



Fonte: Adaptado de CNES (2016).

A distância (R) entre o satélite e o NMM é expressa pela Equação 3 (CHELTON et al., 2001):

$$R = R_s - \sum_j \Delta R_j. \quad (3)$$

onde o somatório envolve as diversas correções necessárias.

Conforme Cheney et al. (1987) as correções devem ser aplicadas aos dados de satélite a fim de eliminar diversos efeitos que afetam os valores medidos pelo altímetro. Na utilização do *range* (distância do centro de massa do satélite até a

superfície do mar) deve-se fazer uma série de correções, pois o mesmo sofre influências das condições ambientais, cuja negligência pode inviabilizar a utilização dos dados dos altímetros.

De acordo com Luz (2008) o *range* corrigido (R) é igual à Equação 4:

$$R = R_S - \sum r_{instrum} + \sum r_{atmosf} + \sum r_{superf} + \sum r_{geof}. \quad (4)$$

As correções instrumentais ($r_{instrum}$), referem-se, dentre outras causas, às alterações de frequência do sinal refletido, à deriva do temporizador, às variações de atitude do satélite e aos ajustes introduzidos pelos próprios sistemas de coleta e tratamento do sinal refletido, embarcados no satélite, a fim de maximizar a resolução vertical das observações (CHELTON et al., 2001, p. 33).

Os efeitos atmosféricos (r_{atmosf}) são constituídos pelas componentes ionosférica e troposférica. Esta última, por sua vez, é tratada separadamente segundo os efeitos dos gases secos e do vapor d'água (LUZ, 2008).

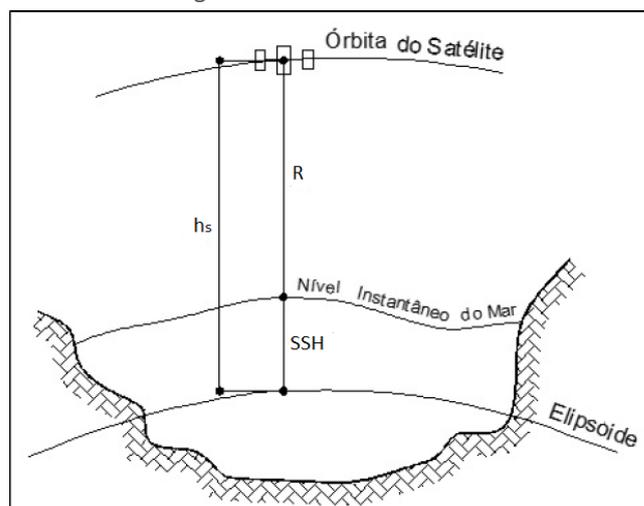
Segundo Luz (2008) as correções (r_{superf}) referentes à superfície refletora dizem respeito à irregularidade da superfície oceânica em função das ondas, que introduz um desvio, em relação ao NMM instantâneo, conhecido comumente por *Sea State Bias*(SSB).

Dentre as correções geofísicas (r_{geof}), incluem-se as marés terrestres e oceânicas, as alturas geoidais, o nível dinâmico do mar, e o efeito do barômetro inverso (variação da pressão atmosférica) (LUZ, 2008).

Logo, a altitude da superfície do mar em relação ao elipsoide de referência (SSH) é derivada da diferença da altitude do satélite sobre um elipsoide de referência (h_s) e a distância corrigida (R) (Equação 5) (Figura 8) (DALAZOANA et al., 2005):

$$SSH = h_s - R. \quad (5)$$

Figura 8 – Estimativas da SSH

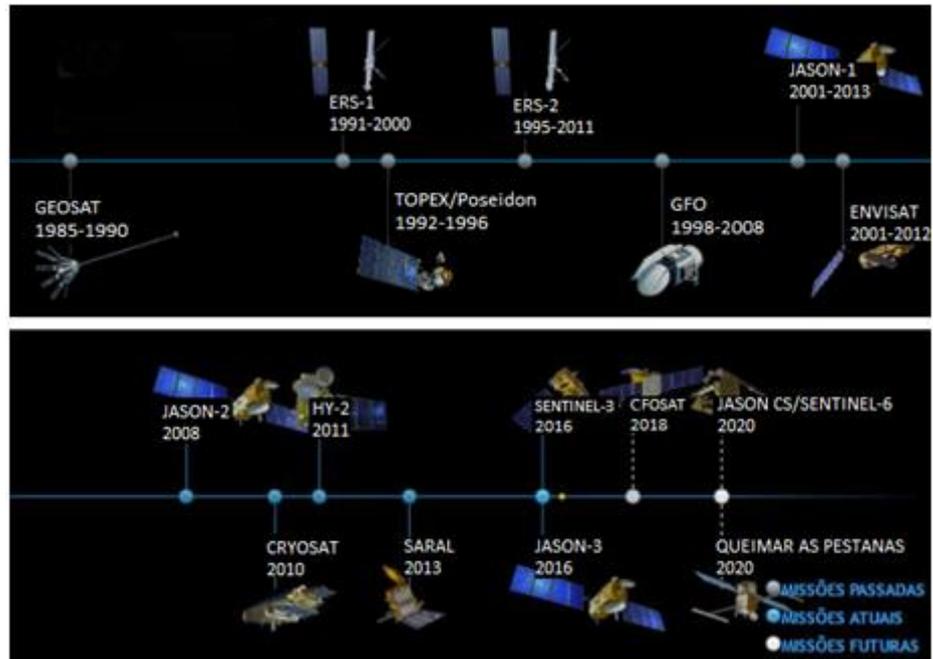


Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

MISSÕES DOS SATÉLITES ALTÍMETROS

Segundo Luz (2008) os conceitos da ALTSAT vêm sendo realizados e aprimorados mediante diferentes missões (Figura 9).

Figura 9 – Cronologia das missões espaciais



Fonte: CNES (2016).

“A técnica da altimetria satelital foi testada pela primeira vez durante as missões SKYLAB, entre os anos de 1973 e 1974, sendo que a precisão conseguida com o altímetro foi de 1 a 2 m (SEEBER, 2003, p. 444). Posteriormente, novas e melhoradas versões de altímetros voaram com os satélites GEOS-3 (1975), SEASAT-1 (1978), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), TOPEX/Poseidon (1992), Jason-1 (2001), entre outros, sendo que em muitos destes satélites a precisão do altímetro é melhor do que 3 cm” (DALAZOANA, 2005).

O satélite TOPEX/Poseidon representa a mais duradoura missão da altimetria por satélites, como mostra as informações da Tabela 1, cujo contínuo processo forneceu dados de alta precisão (SEEBER, 2003). Com uma precisão aproximada de 2 cm, este satélite ganhou um companheiro em 2001, o Jason-1, cujo altímetro tem características similares, os dois satélites voaram em órbitas paralelas intercaladas, de modo a maximizar a resolução espacial Polito e Sato (2003) e para assegurar a continuidade da série de medidas foi lançado em junho de 2008 o satélite Jason-2 e o Jason-3 em 2016 (CNES, 2016).

Tabela 1 – Informações das missões TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e Jason-3

Satélite	T/P	Jason-1	Jason-2	Jason-3
Lançamento	10/01/1992	07/12/2001	21/06/2008	17/01/2016
Final	18/01/2006	01/07/2013		
Agência	CNES/NASA	CNES/NASA	CNES/NASA/ EUMESAT/NOAA	CNES/NASA/ EUMESAT/NOAA
Objetivo	Medir a altura da superfície do mar			

Fonte: Adaptado de CNES (2016).

Assim os satélites TOPEX/Poseidon e Jason viajam a uma altitude de 1336 km (CNES, 2016), com velocidade de 7 km/s e a 66º de inclinação do eixo polar da Terra, por isso realiza medições somente no intervalo entre 66º graus Norte e 66º graus Sul. Por esta órbita o satélite passa em um mesmo ponto a cada 10 dias, amostrando de forma uniforme todo o globo. Quanto à precisão o satélite TOPEX/Poseidon apresenta 3,0 cm, Jason-1 2,5 cm, Jason-2 2,5 cm e Jason-3 2,5 cm. As medições estão referenciadas em um elipsoide de revolução, no caso use-se o *World Geodetic System* (WGS-84) (PEIXOTO, 2007).

Cabe ressaltar que dados das missões de ALTSAT, bem como produtos derivados são disponibilizados à comunidade científica internacional via uma rede de distribuição, como exemplo, o *Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques* data (AVISO) do CNES (no endereço eletrônico <https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>) (DALAZOANA, 2005).

OBTENÇÃO DO NMM POR ALTSAT E TNMM

A análise dos dados de ALTSAT pode proporcionar o conhecimento da variação do NM em escala global e regional. Uma das vantagens é a de que os dados provenientes das missões de ALTSAT, em princípio, não estão contaminados por possíveis movimentos da crosta (DALAZOANA, 2005).

De acordo com Palmeiro (2011) na ALTSAT os satélites com órbitas bem determinadas e dotados de radares-altímetros, medem a distância que os separa da superfície instantânea do oceano. Tais satélites incorporam também radiômetros que permitem uma modelagem dos efeitos da ionosfera e troposfera na propagação do sinal de radar.

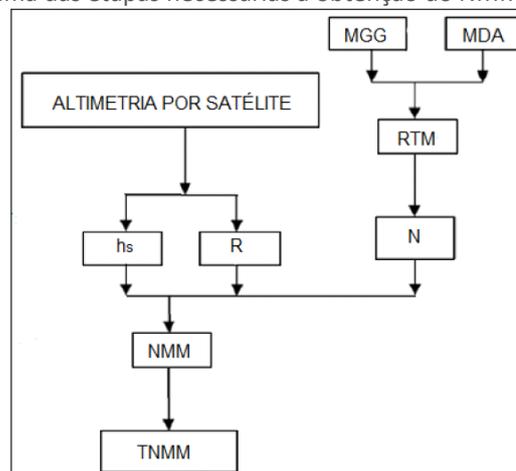
A principal significância do método utilizado pela ALTSAT resulta da possibilidade de imageamento de grandes áreas sobre os oceanos em um período de tempo relativamente curto e determinando uma representação detalhada da superfície do mar com alta resolução espacial e temporal (SEEBER, 2003, p.443).

Das observações do NM obtém-se o NMM e deste a TNMM. Uma estimativa da TNMM pode ser derivada a partir de missões de ALTSAT, as quais permitem a determinação do NM com relação ao elipsoide (PALMEIRO, 2011).

Assim de acordo com Silva et al. (2013) o método para a determinação da TNMM, vistos em diversas pesquisas e a ser utilizado deve ser o Método Direto – utiliza-se a altitude do satélite sobre um elipsoide de referência (h_s) e a altitude sobre a superfície instantânea do mar (R), do processamento de ALTSAT, a determinação do NMM é realizada a partir da média das altitudes da superfície do mar (SSH) e utiliza N obtido de modelos geoidais (Modelo Global do Geopotencial – MGG) combinados com os *Modelling Digital Altimeter* (MDA) e *Radar Topography Mission* (RTM).

A Figura 10 ilustra a metodologia para obtenção do NMM através da ALTSAT e conseqüentemente da TNMM (SILVA et al., 2013).

Figura 10 – Fluxograma das etapas necessárias à obtenção do NMM por ALTSAT e TNMM



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2013).

OBTENÇÃO DO NMM

O NMM pode ser derivado dos dados de uma missão da ALTSAT ou da combinação de dados de diferentes missões com diferentes resoluções espaciais e temporais (DALAZOANA, 2005).

A altitude da superfície do mar (SSH) é calculada para cada medição altimétrica considerada como válida de acordo com o critério (por limiar, por ranhura, por estatística sobre a faixa solo) aplicado tanto para os principais parâmetros altimétricos, para as correções geofísicas ou diretamente na SSH, esses critérios podem variar de uma missão para a próxima, dependendo das características dos altímetros. Dessa forma, o NMM é uma média da SSH ao longo de todos os oceanos, com respeito a uma referência (CNES, 2016).

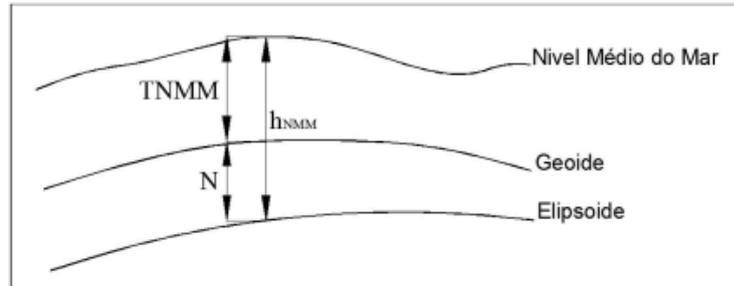
OBTENÇÃO DO TNMM

A TNMM em escala global pode ser estimada a partir das diferenças entre: a altitude do Nível Médio do Mar com relação a um elipsoide de referência (h_{NMM}),

derivada da ALTSAT, e a altura geoidal (N) obtida de um modelo geoidal global, como indicado na Equação 6 e na Figura 11 (DALAZOANA, 2005).

$$TNMM = h_{NMM} - R. \quad (6)$$

Figura 11 – Estimativas da TNMM



Fonte: Adaptado de Dalazoana (2005).

Vale destacar que a altura geoidal pode ser extraída de algum dos modelos globais do geopotencial disponíveis. No entanto a diferença de resolução espacial entre os dados de ALTSAT e mesmo os mais recentes modelos do geopotencial introduz inconsistências nesse tipo de solução (LUZ, 2008). Segundo Escobar e Silveira (2001) para ser compatível com a precisão da ALTSAT é necessária a determinação geoidal com precisão de 1-2 cm.

Segundo Dalazoana (2005) esta estimativa da TNMM (NMM - geoide) é baseada numa aproximação puramente geométrica. Os erros na estimativa da TNMM são provenientes, na sua maioria, dos erros do modelo geoidal, assim a estimativa está limitada pelos erros no conhecimento do campo da gravidade. Atualmente, este problema pode ser sanado com a utilização de dados das missões espaciais desenvolvidas especificamente para a determinação do campo da gravidade da Terra, como as missões *Challenging Minisatellite Payload* (CHAMP), *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e *Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer* (GOCE) (DREWES, 2003; SEEBER, 2003, p. 464) que permitem uma melhoria no desenvolvimento dos modelos globais do geopotencial.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A definição clássica de DV pressupõe que o geoide coincide com o NMM estabelecido por observações maregráficas durante determinado período. Porém, devido a TNMM o NMM não é rigorosamente coincidente com o geoide. Portanto, a TNMM é um efeito sistemático que contribui para o afastamento entre o NMM e o geoide, em que a principal consequência é a incompatibilidade dos DVs. Dessa forma, a TNMM é um importante parâmetro a ser investigado quando se trata da materialização do geoide.

As variações do NM, sobretudo em regiões costeiras extensas, como por exemplo, no caso do Brasil, tornam incompatíveis os *data* definidos pelo NMM, justificando a adoção de um *Datum* Vertical Global. A adoção de DV unificado tem como principal objetivo obter altitudes ortométricas compatíveis em escalas regional e global. Assim, atualmente a unificação de DVs vem sendo estudada no mundo inteiro, no Brasil, o SIRGAS GTIII vem participando nos esforços para o

estabelecimento de uma Rede Vertical de Referência unificada para a América do Sul e Central e com possível extensão ao Caribe. Novas possibilidades têm sido evidenciadas para a conexão de Redes Verticais com base em novos métodos da Geodésia e bases de dados globais constituídas principalmente a partir de esforços coordenados e novas missões de aquisição de dados baseadas principalmente em plataformas orbitais. E nesse sentido a ALTSAT têm sido uma técnica eficaz no monitoramento do Nível do Mar.

Quando se trata de ALTSAT oceanográfica a precisão das medidas da altitude da superfície do mar depende muito das correções aplicadas aos dados coletados pelo altímetro. Dessa forma é necessário entender a física na qual se baseiam estas correções para saber quais devem ser aplicadas em situações diversas. Vale ressaltar que uma das grandes vantagens da ALTSAT é que possibilita o imageamento de grandes áreas sobre o oceano e que proporciona uma representação detalhada da superfície do mar com alta resolução espacial e temporal e que pode complementar as informações geradas pelos marégrafos, devido à sua densidade e cobertura quase mundial.

Cabe salientar que o assunto é complexo e que a maioria das informações são provenientes dos fabricantes e de alguns pesquisadores interessados na definição de um geoide global e de uma rede altimétrica única, sendo assim, devido ao tempo hábil de um trabalho de conclusão de curso e devido à dificuldade envolvida no assunto, o objetivo deste estudo foi fazer um estado da arte e poder contribuir para os futuros trabalhos, mostrando o princípio da altimetria por satélites e sua importância para que estes possam usar os dados em aplicações de seu interesse.

Study about mean sea level determination with altimetry satellite

ABSTRACT

The shape attributed to the Earth, by convention, is the geoid. This is considered as the equipotential surface which coincides with the undisturbed Mean Level of the Seas (MSL). It is of fundamental importance to geodesists determining the MSL (altimetric Data), since this play an important role in the realization of global reference systems and enable the integration of data referred to classic vertical networks, where each datum is defined by the MSL. Currently altimetry satellite (ALTSAT) is an effective technique for monitoring the MSL, as it provides a methodical and continuous data collection and that in turn allows the global observation of the sea level (SL). Resulting in a data structure with several oceanographic parameters and time series of consistent data for long periods. This greatly facilitates the use of these data for studies of NMM and, hence, the determining of the Mean Dynamic Topography (MDT) and geoid itself. This paper focuses on the study of obtaining MSL obtained by altimetry missions, focusing on TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 and Jason-3 satellites aiming the importance of MSL for MDT determination.

KEYWORDS: Geoid. MSL. MDT. Altimetry Satellite.

REFERÊNCIAS

BLITZKOW, D.; CAMPOS, I. O.; FREITAS, S. R.C. Altitude: o que interessa e como equacionar?. I **Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, 2004. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/geodesia/Artigos/G004.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

BOSCH, W., FENOGLIO-MARC, L., WÖPPELMAN, G., MARCOS, M., NOVOTNY, K., SAVCENKO, R., KARPYTCHEV, M., NICOLLE, A., BECKER, M., LIEBSCH, G. Coastal Sea Surface Topography – a Synthesis of Altimetry, Gravity, and Tide Gauges. In: **AVISO Newsletter** No. 11, CNES, 2006.

BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., ŠIMA, Z., VATRT, V., VÍTEK, V. VOJTÍŠOVÁ, M. The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system. **Journal of Geodesy**, Springer Berlin, Heidelberg, V. 81, p. 103-110. 2007. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0091-3>.

CARLSSON, M. The mean sea-level topography in the Baltic Sea determined by oceanographic methods. **Marine Geodesy**. v. 21, n.3, 203-217, 1998. <https://doi.org/10.1080/01490419809388136>.

CAZENAVE, A. Les Variations Actuelles du Niveau Moyen de la Mer. **Earth & Planetary Sciences**. v. 329, n. 7, p. 457-469, oct. 1999. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)80019-1](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)80019-1).

CAZENAVE, A.; DO MINH, K.; GENNERO, M.C. Present-day sea level rise: from satellite and in situ observations to physical causes. In: HWANG, C.; SHUM, C. K.; LI, J. (Ed.). **Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography**. IAG Symposium 126, Wuhan, China. Berlin: Springer-Verlag, 2003. p. 23-31.

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES (CNES). **AVISO: Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques**, 2016. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

CHELTON, D. B.; RIES, J. C.; HAINES, B. J.; FU, L. L.; CALLAHAN, P. S. Satellite Altimetry. In: FU, L. L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite Altimetry and Earth Sciences: a Handbook of Techniques and Applications**. Academic Press, 2001. p. 1-131.

CHENEY, R. E, DOUGLAS, B. C., AGREEN, R. W., MILLER L., PORTER D. L. & DOYLE, N. S. **Geosat Altimeter geophysical data record user handbook**. Tech. Memo. NOS NGS - 46. Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Boulder, Colo, 30p.,1987.

DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos do NMM a partir de séries temporais maregráficas e de Altimetria por satélites visando a integração da rede vertical brasileira ao SIRGAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 2, p. 140-153, ago. 2005.

DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à análise temporal do Datum Vertical brasileiro**. 2005. 188f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

DREWES, H. **Sistemas de Referência Cinemáticos em Geodésia** – Definição, Realización y Mantenimiento. Palestra proferida na UFPR, Curitiba, mai. 2003.

ESCOBAR, I. P.; SILVEIRA, F. J. C. **Sistema de altitude: integração continente – oceano**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FAGGION, P. L. Modelagem do potencial anômalo no *Datum* Vertical Brasileiro visando a sua nova definição. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 2., p. 395-419, 2007.

HECK, B., RUMMEL, R. Strategies for solving the Vertical *Datum* problem using terrestrial and satellite geodetic data. In: SÜNKEL, H., BAKER, T. **Sea Surface Topography and the Geoid**. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1990. p. 116-128.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Noções Básicas de Cartografia**, 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/indice.htm>. Acesso em: 08 abr. 2016.

IOC. Intergovernmental Oceanographic Commission. **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**. Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. IOC – Intergovernmental Oceanographic Commission, Manual and Guides No. 14, UNESCO, 2002. 49 p.

LISITZIN, E. **Sea level changes**. Elsevier Oceanography Series, vol. 8. 1. ed. Amsterdam: Elsevier. 1974. 285 p.

LOPES, A.B. **O geóide gravimétrico e o Nível Médio do Mar na região do Datum altimétrico brasileiro: um estudo comparativo**. 2006. 82f. Dissertação (Mestrado em Geofísica), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LOPES, A. B.; HARARI, J.; MESQUITA, A. R. A utilização de satélites altimétricos e gravimétricos no estudo das variações do nível do mar no Atlântico Sul. In: **Afro-America Gloss News**, 01 dez/2008. IO – USP, São Paulo.

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; PINHEIRO, R. R.; GOLDANI, D.; SANTOS, C. C. C.; DI MAIO PEREIRA, N. R.; SUBIZA PIÑA, W. H. Avaliação das realizações da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro. In: Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CBCG), 5., 2007, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2007. CD-ROM.

LUZ, R. T.; **Estratégias para modernização da componente vertical do sistema geodésico brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. 2008. 207f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LUZ, R. T.; BOSCH, W.; DE FREITAS, S.R.C.; HECK, B. Topografia do Nível Médio do Mar no litoral sul- sudeste brasileiro. In: **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife - PE, 2008.

PALMEIRO, A. S. **Análise do vínculo do DVB a um Sistema Global de Altitudes com base em soluções fixadas e livres do PVCG**. 2011. 144f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PEIXOTO, P.S. **Jason-1: Lendo os dados de altimetria por satélite para o nível do mar**, IO – USP, São Paulo, maio/2007.

PICKARD, G., L. **Oceanografia física descritiva**. Universidade de Columbia Britânica. 1974. 180 p.

POLITO, P. S.; SATO, O. T. **Oceanografia por Satélites**. Instituto Oceanográfico – USP/ INPE –São José dos Campos, São Paulo, 2003, 52 p.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SILVA, J. S.; **Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia Amazônica**. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, M. T. Q.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. Avaliação da Topografia do Nível Médio do Mar na conexão dos *Data* da rede altimétrica fundamental do Brasil. **Reunion SIRGAS 2013 (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guadia)**, Ciudad de Panamá. Panamá, 2013.

TORGE, W. **Geodesy, an introduction**. Berlin: Walter de Gruyter, 1980.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. 416 p.

VANICEK, P. & KRAKIWSKY, E. **Geodesy: the concepts**. North- Holand, Amsterdam, 1986. 697 p.

Recebido: 12 nov. 2016

Aprovado: 09 mar. 2018

DOI: 10.3895/rbgeo.v6n1.5518

Como citar: REIS, V. P.; PALMEIRO, A. S.; BARBOSA, L. G.. Estudo da obtenção do nível médio do mar com altimetria por satélites. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 3-22, jan/mar. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Vania Pereira Reis

Rua Maria Assunção, 105, CEP 35547-000, Carmo da Mata, Minas Gerais, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

