

ALTIMETRIA GNSS DE PRECISÃO APLICADA AO MONITORAMENTO DA DINÂMICA SEDIMENTAR COSTEIRA DE CURTA DURAÇÃO EM ESCALA REGIONAL

*GNSS altimetry of precision applied to monitoring of coastal sedimentary dynamics
of short term in regional scale*

MARCELO SOARES TELES SANTOS¹
VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO²
ANDERSON TARGINO DA SILVA FERREIRA²
ANDRÉ LUIS SILVA DOS SANTOS²

¹Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC)
Câmpus Universitário, CEP 44380-000, Cruz das Almas/BA

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
Departamento de Geologia - DGEO
Campus Universitário, CEP 59078-970, Natal/RN
mstsantos@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta metodologia utilizada na altimetria GNSS de precisão aplicada em estudos costeiros de praias arenosas localizadas no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, baseada em cálculo, modelagem e remoção da Componente Sistemática (CS) do modelo geoidal. Os métodos foram aplicados e avaliados utilizando o modelo geoidal MAPGEO. O cálculo da CS foi realizado em Referências de Nível (RNs) localizadas na área de estudo pela subtração entre as alturas geoidais gravimétricas, obtidas pelo modelo geoidal, e as geométricas, obtidas pelo posicionamento GNSS em RNs. Após modelagem e remoção da CS, por um modelo superfície polinomial quadrático, a CS calculada, com média de -0,498 m, Desvio Padrão (DP) de 0,110 m e Erro Quadrático Médio (EQM) de 0,509 m, passou a ter média nula, DP de 0,065 m e EQM de 0,062 m. Avaliações realizadas a partir de pontos de controle externos ao modelo mostraram que a metodologia forneceu acurácia decimétrica à altimetria GNSS, adequada ao

monitoramento da elevada dinâmica sedimentar em ambientes costeiros, fato comprovado no estudo de caso apresentado.

Palavras-chave: Altimetria GNSS; Modelo Geoidal; Componente Sistemática.

ABSTRACT

This paper presents methodology applied in altimetry by Global Navigation Satellite System (GNSS) of precision in coastal areas located on Northern Coast of Rio Grande do Norte, Northeastern Brazil, based on calculation, modeling, and removal of Systematic Component (SC) of geoid model. Methods were implemented and evaluated by using the MAPGEO geoid model. The calculation of the SC was performed in Benchmarks (BM) located on study area by subtraction between gravimetric geoid heights obtained by geoid model, and geometric geoid heights obtained by GNSS positioning in BM. After modeling and removing SC by a quadratic polynomial surface model, SC calculated, with averaging -0.498 m, Standard Deviation (SD) 0.110 m, and Mean Square Error (MSE) 0.509 m, now has zero mean, SD 0.065 m, and MSE 0.062 m. Conducted evaluations from control points outside the model showed that methodology provided decimeter accuracy for GNSS altimetry, proper to monitoring of high sediment dynamics in coastal environments, proven in the studied case.

Keywords: GNSS Altimetry; Geoid Model; Systematic Component (SC).

1. INTRODUÇÃO

Na área de estudo, localizada no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, setor sob a influência dos ventos alísios e em regime de mesomares semidiurnas, o monitoramento da intensa dinâmica sedimentar tem sido realizado pela comparação entre altitudes ortométricas (pautada ao modelo geoidal) de pontos ou trechos da orla litorânea em acompanhamentos temporais anuais e sazonais. Nesse caso, as variações altimétricas mensuradas subsidiaram estudos relacionados à evolução costeira, tais como no cálculo de volume e orientação do transporte de sedimentos, na identificação de zonas de risco à erosão costeira, no uso e ocupação sustentável do solo em áreas com altas taxas de erosão e/ou acreção que interferem em atividades antrópicas, na análise da elevação relativa do nível do mar em associação aos fenômenos climáticos globais como *El Niño* e *La Niña* (AMARO *et al.*, 2013; AMARO *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2011; KLEMAS, 2011; COWART *et al.*, 2010; GONÇALVES *et al.*, 2010; ROCHA *et al.*, 2009; BAPTISTA *et al.*, 2008; ESTEVES *et al.*, 2006; MOORE *et al.*, 2006; BOAK & TURNER, 2005; SOUTO *et al.*, 2004).

A altitude ortométrica tem sido obtida a partir da altimetria *Global Navigation Satellite System (GNSS)* no modo absoluto, onde, a altitude ortométrica (H) de um ponto é determinada pela combinação da altitude geométrica (h), obtida pelo posicionamento GNSS, e da altura geoidal (N), fornecida por um modelo geoidal

(SANTOS & SÁ, 2006; KIAMEHR, 2002; SOUZA, 2002; KOTSAKIS & SIDERIS, 1999; FEATHERSTONE *et al.*, 1998b; OLLIKAINEN, 1998):

$$H \cong h - N \quad (1)$$

No entanto, para obter acurácia na determinação da altitude ortométrica a partir do GNSS, as alturas geoidais gravimétricas foram compatibilizadas ao sistema altimétrico local pelo cálculo, modelagem e remoção da Componente Sistemática (CS) do modelo geoidal (SANTOS *et al.*, 2011; SANTOS & SÁ, 2006). A CS representa a separação entre o modelo geoidal gravimétrico e o obtido pelo posicionamento GNSS em Referências de Nível (RNs) e faz com que a altitude ortométrica determinada pela altimetria GNSS tenha acurácia inferior aos limites de tolerância adotados no nivelamento de precisão (SANTOS *et al.*, 2011; SANTOS & SÁ, 2006; ROMAN *et al.*, 2004; TÓTH *et al.*, 2000; FEATHERSTONE *et al.*, 1998a; BARBARELLA *et al.*, 1998).

O objetivo desse trabalho é apresentar a metodologia utilizada na altimetria GNSS de precisão aplicada em estudos costeiros de praias arenosas localizadas no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, baseada em cálculo, modelagem e remoção da CS do modelo geoidal. O cálculo e a remoção da CS foram realizados em um conjunto de RNs no entorno da área de estudo pela comparação entre as alturas geoidais gravimétricas, obtidas em modelo geoidal, e as calculadas pelo posicionamento GNSS em RNs.

Em trabalhos anteriores da área de estudo (SANTOS & AMARO, 2011; SANTOS *et al.*, 2011) a altimetria GNSS foi realizada no modo relativo, na qual, a altitude de um ponto de interesse é determinada em relação a uma ou mais RNs, cuja altitude é conhecida. Esse modo apresenta a vantagem do uso da diferença de altura geoidal, mais precisa do que a altura geoidal absoluta por eliminar erros sistemáticos (SANTOS & AMARO, 2011). No entanto, há necessidade de posicionamento GNSS em RNs próximas da área de estudo, o que nem sempre é possível, devido ao nível atual de destruição dos marcos geodésicos. Assim, a presente proposta de compatibilização do modelo geoidal ao sistema altimétrico, e seu uso na altimetria GNSS, gerou benefícios estratégicos, tais como alta precisão, rapidez, simplicidade operacional e baixo custo nos levantamentos (SANTOS & AMARO, 2011; SANTOS *et al.*, 2011), o que fez com que a metodologia empregada substituísse os métodos altimétricos anteriormente utilizados.

Ainda, devido ao aperfeiçoamento e modernização dos modelos geoidais na última década, em termos de metodologia e acervo de dados, este trabalho forneceu um indicativo da atual acurácia das alturas geoidais gravimétricas e da situação física dos marcos geodésicos da Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB) no extremo Nordeste do Brasil, localizado a milhares de quilômetros do *datum* altimétrico de Imbituba/SC.

2. COMPONENTE SISTEMÁTICA DO MODELO GEOIDAL

Os modelos geoidais são tradicionalmente utilizados em estudos geofísicos e geodésicos sobre a forma, a estrutura interna e os processos dinâmicos atuantes na Terra (SÁ, 2004; MOLINA, 1999; SÁ & MOLINA, 1995). Com o advento da Geodésia Espacial, tornou-se importante na determinação da altitude ortométrica a partir do posicionamento GNSS (Equação 1) necessária à execução de aplicações em Geociências, sobretudo quanto à morfometria de precisão dos terrenos. Em função da fonte de dados de origem, os modelos geoidais podem ser de dois tipos, o gravimétrico e o determinado por GNSS em RNs, doravante chamado de geométrico. O modelo geoidal gravimétrico é tradicionalmente determinado através da fórmula de Stokes e da Colocação por Mínimos Quadrados, usando dados de gravimetria terrestre, modelo topográfico digital e modelos do geopotencial. O modelo geoidal geométrico é determinado pelo posicionamento GNSS sobre RNs a partir do rearranjo da Equação (1), por:

$$N_{GNSS} = h - H \quad (2)$$

Onde, h é a altitude geométrica, obtida pelo GNSS; e, H é a altitude ortométrica, dado da RN.

Os modelos geoidais gravimétrico e geométrico não são perfeitamente coincidentes. A discrepância entre a altura geoidal gravimétrica (N_g) e a geométrica (N_{GNSS}) caracteriza a CS do modelo geoidal, dada por (SANTOS & SÁ, 2006):

$$\Delta N = N_g - N_{GNSS} \quad (3)$$

A CS representa a separação entre o modelo geoidal gravimétrico e o geométrico e está relacionada às fontes de erros presentes nas componentes h , H e N , presentes na Equação (3). Assim, as distorções entre os modelos geoidais resultam das fontes de erros do sistema GNSS, da rede altimétrica e do modelo geoidal utilizado. As principais fontes de erros envolvidos nas variáveis da altimetria GNSS são aleatórios, sistemáticos e decorrem da técnica utilizada em sua determinação, das diferenças entre sistemas de referência, da aproximação teórica no processamento de dados e da instabilidade de estações com o tempo (MONICO, 2007; FOTOPOULOS, 2003; SEEBER, 1993; FEATHERSTONE *et al.*, 1998b).

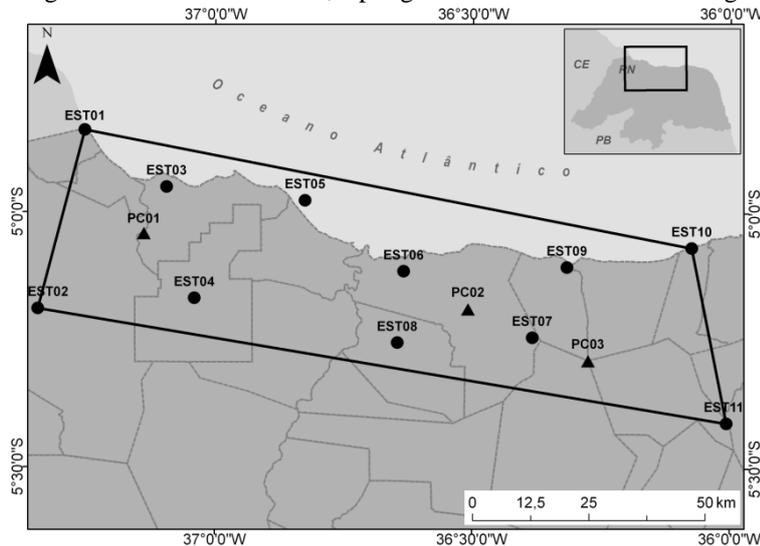
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para cálculo, modelagem e remoção da CS do modelo geoidal, assim como seu uso na altimetria GNSS de precisão.

3.1 Cálculo, modelagem e remoção da Componente Sistemática

A Figura 1 apresenta a área de estudo, localizada numa faixa litorânea de aproximadamente 150 km entre os municípios de Tibau e Caiçara do Norte, assim como a localização das RNs utilizadas na metodologia. A metodologia utilizada envolveu 14 RNs da área de estudo, das quais, 11 foram utilizadas na modelagem da CS e 3 na avaliação da metodologia. Os limites da área de modelagem são representados pelo polígono da Figura 1: Limite externo oceânico entre os municípios de Tibau (EST01) e Caiçara do Norte (EST10) e limite interno continental entre os municípios de Mossoró (EST02) e Jandaíra (EST11).

Figura 1 – Localização da área de estudo. Pontos são RNs utilizadas na modelagem; triângulos são RNs de controle; e polígono são os limites da modelagem.



As RNs pertencem à Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB), as quais possuem altitudes ortométricas de precisão referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (IBGE, 2013). As coordenadas geodésicas de precisão das RNs foram determinadas pelo posicionamento GNSS no modo relativo estático (MONICO, 2007; SEEBER, 2003) em relação à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do SGB, com receptores de dupla frequência, sessão mínima de 4 horas e efemérides precisas. Com os parâmetros utilizados nos processamentos e ajustamentos dos dados, as coordenadas geodésicas foram obtidas com precisões de $0,011 \pm 0,009$ m em N, $0,015 \pm 0,014$ m em E, e $0,032 \pm 0,031$ m em h. As alturas geoidais gravimétricas oficiais do SGB foram obtidas no modelo geoidal MAPGEO2004, desenvolvido e disponibilizado pelo IBGE em conjunto com diversas instituições do Brasil. Vale destacar que a base de dados multitemporal dos

monitoramentos costeiros, implantada no ano de 2009, está em processo de atualização para o modelo MAPGEO2010, oficialmente adotado no SGB na atualidade (IBGE, 2013; MATOS *et al.*, 2012). No entanto, a fonte de dados não inviabiliza a metodologia apresentada neste trabalho, uma vez que pode ser aplicada a qualquer modelo geoidal.

Estudos sobre modelagem da CS de modelo geoidal gravimétrico, usando GNSS e rede altimétrica, podem ser encontrados, por exemplo, em NUNES (2012), FOTOPOULOS (2003), KIAMEHR (2002) e KOTSAKIS & SIDERIS (1999). A maioria dos estudos usa o seguinte modelo (KOTSAKIS & SIDERIS, 1999):

$$h_i - H_i - N_i = a_i^T x + v_i \quad (4)$$

Onde x é um vetor $n \times 1$ de parâmetros desconhecidos, a_i é um vetor $n \times 1$ de coeficientes conhecidos, e v_i é o resíduo aleatório. A parte paramétrica $a_i^T x$ descreve as possíveis inconsistências de *datum* e outros efeitos sistemáticos no conjunto de dados.

Na prática, a escolha da forma paramétrica do modelo de superfície não é uma tarefa trivial, pois existe uma grande quantidade de modelos disponíveis, tais como os polinomiais e os de transformação de similaridade. O problema geralmente encontrado nesse tipo de aplicação é que para cada área de levantamento, o modelo geoidal gravimétrico pode conter erros sistemáticos diferentes em relação ao sistema altimétrico (SANTOS & SÁ, 2006).

Nunes (2012), Santos & Sá (2006) e Souza (2002) verificaram que o modelo polinomial quadrático é adequado para modelagem da componente sistemática do modelo geoidal:

$$a_i^T x = a_{00} + a_{01}y + a_{02}y^2 + a_{10}x + a_{11}xy + a_{20}x^2 \quad (5)$$

Onde, a_{ij} representa os coeficientes do polinômio e (x, y) as coordenadas dos pontos. O modelo da Equação (5) é então aplicado para todos os pontos disponíveis e um ajustamento por mínimos quadrados é realizado para estimar os resíduos v_i , os quais indicam a acurácia do modelo geoidal.

A remoção da componente sistemática do modelo geoidal foi feita diretamente na altura geoidal do ponto de interesse, por:

$$N_{gc} = N_g - \Delta N_m \quad (6)$$

Onde, N_{gc} é a altura geoidal compatível ao sistema altimétrico (após a remoção da componente sistemática); N_g é a altura geoidal de origem, obtida no modelo

geoidal; e, ΔN_m é a CS do modelo geoidal.

Assim, o cálculo da altitude ortométrica compatível ao sistema altimétrico é realizado por:

$$H = h - N_{gc} \quad (7)$$

Onde, h é a altitude geométrica obtida por GNSS e N_{gc} é a altura geoidal gravimétrica compatível ao sistema altimétrico.

3.2 Avaliação da metodologia experimental

O grau de ajustamento da superfície modelada foi avaliado a partir das alturas geoidais compatibilizadas ao sistema altimétrico local, após a modelagem (Equação 5) e a remoção (Equação 6) da componente sistemática. Para tanto, nas RNs utilizadas na modelagem da CS foram calculadas as discrepâncias das alturas geoidais gravimétricas compatibilizadas (N_{gc}) em relação às respectivas alturas geoidais de referência das RNs (N_{GNSS}), por:

$$\delta N_{gc} = N_{gc} - N_{GNSS} \quad (8)$$

Onde, δN_{gc} é a discrepância da altura geoidal compatibilizada ao sistema altimétrico, também chamada de Componente Residual (CR) do modelo geoidal.

Na avaliação da altimetria GNSS (Equação 7) são calculadas, em RNs de controle externas ao modelo, as discrepâncias das altitudes ortométricas obtidas pela metodologia proposta (H) em relação às respectivas altitudes ortométricas de referência (H_r) das RNs de controle, por:

$$\delta H = H - H_r \quad (9)$$

Onde, δH é a discrepância da altitude ortométrica calculada pela Altimetria GNSS.

Assim, para o conjunto de discrepâncias da altura geoidal compatibilizada ao sistema altimétrico (Equação 8) e da altitude ortométrica calculada pela Altimetria GNSS (Equação 9), a medida de acurácia é calculada pelo Erro Quadrático Médio (EQM), dado por (MIKHAIL & ACKERMANN, 1976 *apud* MONICO, 2009):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (10)$$

Onde, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ e n é o número de pontos de controle utilizados na avaliação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta aplicação e avaliação da metodologia proposta em estudo de caso realizado na área de estudo, o Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil.

4.1 Componente sistemática e residual do modelo geoidal

As Figuras 2 e 3 apresentam a CS (Equação 3) e a CR (Equação 8) do modelo geoidal, respectivamente, calculados nas 11 RNs utilizadas na modelagem da CS apresentadas na Figura 1. A CS apresentou a seguinte estatística: Média de -0,498m, Desvio Padrão (DP) de 0,110 m, EQM de 0,509 m, mínimo de -0,738 m e máximo de -0,369 m. A CR apresentou a seguinte estatística: Média nula, DP de 0,065 m, EQM de 0,062 m, mínimo de -0,121 m e máximo de 0,131 m.

A média de -0,492 m e o EQM de 0,499 m comprovam a existência daCS, como evidenciado em outras regiões do planeta (ROMAN *et al.*, 2004; LACY *et al.*, 2001; TÓTH *et al.*, 2000; FEATHERSTONE *et al.*, 1998b; OLLIKAINEN, 1998; BARBARELLA *et al.*, 1998), e mostram que o modelo geoidal gravimétrico é incompatível ao sistema altimétrico local. Assim, se as altitudes ortométricas fossem determinadas no modo absoluto (Equação 1) com uso do modelo geoidal original teriam um erro médio de aproximadamente 0,5 m, desconsiderando-se as outras fontes de erro. Portanto, o modelo geoidal gravimétrico original não fornece alturas geoidais com acurácia compatível àquelas exigidas no nivelamento de precisão, as quais devem ser relacionadas ao sistema altimétrico local. Ainda, o DP de 0,087 m mostra que a CS possui uma considerável dispersão em torno da média. Tal dispersão ocorre devido ao fato da CS variar em função da localização geográfica, como visualizada na Figura 2, pois, para cada trecho de levantamento, o modelo geoidal gravimétrico pode conter erros sistemáticos diferentes em relação ao sistema altimétrico (SANTOS & SÁ, 2006).

Por outro lado, a média nula da componente residual confirma que a CS foi removida do modelo geoidal, assim como o DP de 0,070m e o EQM de 0,066m indicam que, após a remoção da CS, ainda restaram distorções nas alturas geoidais gravimétricas em relação ao sistema altimétrico local. Tais distorções estão relacionadas à qualidade das variáveis h , H e N utilizadas na modelagem da CS (Equação 3), as quais estão sujeitas a erros que se combinam e se propagam pelo processo de interpolação. Assim, as distorções nas citadas variáveis fazem com que a Equação (1) não seja totalmente satisfeita e que a qualidade da modelagem da CS esteja restrita à acurácia das variáveis. No entanto, a Figura 3 ilustra que a CR possui valores tipicamente inferiores a $\pm 0,1m$, ou seja, as alturas geoidais compatibilizadas possuem acurácia suficiente para o nivelamento de precisão em inúmeras aplicações, inclusive ao monitoramento costeiro.

Figura 2 – CS do modelo geoidal com a localização das RNs utilizadas na modelagem da componente sistemática.

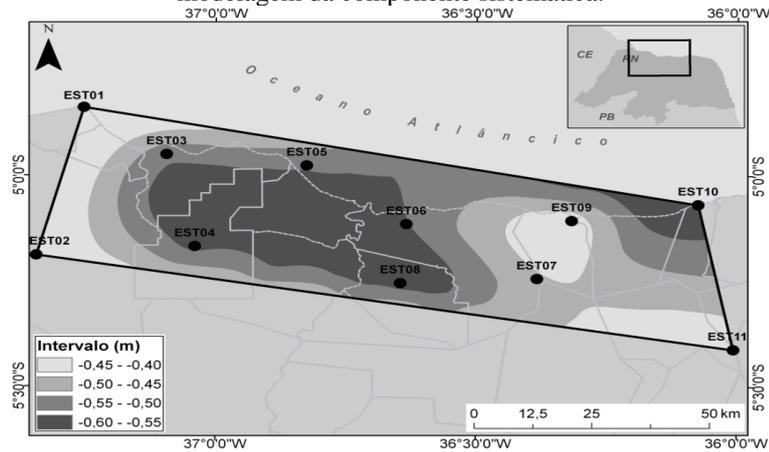
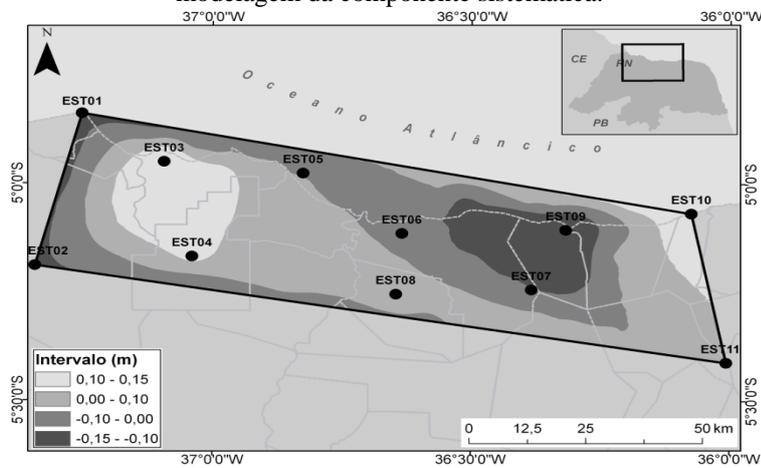


Figura 3 – CR do modelo geoidal com a localização das RNs utilizadas na modelagem da componente sistemática.



4.2 Avaliação da altimetria GNSS

Nas discrepâncias entre as altitudes obtidas pela altimetria GNSS e as altitudes de referência (Equação 9), nas 3 RNs de controle externas ao modelo, foram obtidas as seguintes estatísticas: Média de 0,023 m, DP de 0,024 m, EQM de 0,066m, mínimo de -0,080 m e máximo de -0,035 m. O EQM de 0,066m comprova que a metodologia proposta permite a determinação de altitudes ortométricas com

acurácia de poucos centímetros em levantamentos de escala regional, com os benefícios, em relação aos métodos convencionais, de eficiência, rapidez e baixo custo. Portanto, a integração entre as alturas geoidais gravimétricas compatibilizadas ao sistema altimétrico local e as altitudes geométricas obtidas por GNSS, ambas alcançadas com incertezas de poucos centímetros, fornecem altitudes ortométricas com acurácia decimétrica, suficiente ao monitoramento costeiro e outras atividades onde a precisão é exigida. Como as altitudes geométricas são determinadas de maneira relativamente simples e rápida pelo posicionamento GNSS, uma relevante contribuição foi gerar alturas geoidais compatíveis ao sistema altimétrico com acurácia de poucos centímetros, pela combinação das alturas geoidais obtidas pelos métodos gravimétrico e geométrico.

A combinação das alturas geoidais gravimétricas e geométricas na altimetria GNSS aproveita as vantagens de cada método, eliminando as limitações e erros sistemáticos, além do que (i) aproveita a grande extensão espacial, a boa quantidade e distribuição de pontos amostrais do método gravimétrico; e, (ii) a acurácia das alturas geoidais do método geométrico em relação ao sistema altimétrico. Do mesmo modo como as alturas geoidais do método geométrico são compatíveis com o sistema altimétrico, também são as altitudes ortométricas obtidas a partir do GNSS com uso do modelo geoidal compatibilizado. Portanto, as alturas geoidais do método geométrico eliminam erros sistemáticos envolvidos entre as altitudes definidas pelo *datum* vertical e as obtidas por GNSS usando o modelo geoidal gravimétrico. No entanto, como mostrado anteriormente, o resultado é restrito à qualidade das componentes h , H e N empregadas, as quais estão sujeitas a erros que se combinam e se propagam através do processo de interpolação.

4.3 Aplicações costeiras da metodologia proposta

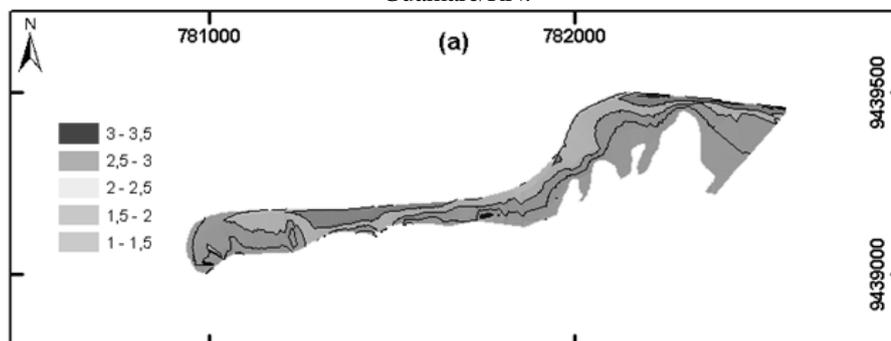
Na metodologia proposta, a altitude ortométrica de um ponto de interesse localizado na área de estudo tem sido realizada com a seguinte estratégia: i) determinação das coordenadas geodésicas do ponto de interesse, pelo posicionamento GNSS; ii) a partir das coordenadas geodésicas obtenção da altura geoidal gravimétrica no modelo geoidal disponível; iii) a partir das coordenadas geodésicas, obtenção da componente sistemática no modelo matemático da Equação (5); iv) cálculo da altura geoidal gravimétrica compatível ao sistema altimétrico (Equação 6) pela remoção da CS; e, v) cálculo da altitude ortométrica pela Equação (7) com uso da altitude geométrica obtida por GNSS (item i) e a altura geoidal compatibilizada (item iv).

Com a estratégia apresentada, a acurácia obtida na altimetria GNSS tem permitido o monitoramento costeiro de precisão em extensas faixas arenosas com reduzido intervalo de tempo. Os monitoramentos geodésicos têm sido realizados em trechos específicos pela a comparação multitemporal entre linha de costae modelos digitais de elevação de setores costeiros levantados pelo posicionamento GNSS no modo relativo cinemático, a partir de estações geodésicas da Rede GNSS do Litoral Setentrional do Estado do RN (RGLS), implantadas na área de estudo para fornecer

bases curtas ao posicionamento GNSS (AMARO *et al.*, 2012; SANTOS & AMARO, 2011; SANTOS *et al.*, 2011).

A Figura 4 ilustra, como exemplo, um trecho do modelo digital de elevação da Praia do Minhoto, no Município de Guamaré/RN. No modelo, nota-se o padrão de distribuição espacial do relevo e das feições morfológicas praias emersas, como declividades dos perfis de praia, cúspides, bermas e dunas (Amaro *et al.* 2013). Nessas aplicações, a altitude ortométrica de precisão relacionada ao *datum* altimétrico do SGB foi de extrema importância, por gerar modelos digitais de elevação relacionados ao nível médio do mar adotado no SGB. Assim, como as altitudes ortométricas dos diversos trechos são relacionadas ao mesmo referencial altimétrico, as feições morfológicas podem ser comparadas em todos os setores da área de estudo, ou em outras áreas, além de fornecer boa precisão altimétrica em relação ao nível médio dos mares. O georreferenciamento em relação ao SGB permite a comparação multitemporal dos modelos digitais, o que possibilita a análise da morfodinâmica praias no domínio temporal, no mesmo nível de detalhe em que as feições morfológicas foram modeladas. As características da metodologia viabilizaram vários estudos ambientais importantes aos diferentes setores da zona costeira, entre eles os de vulnerabilidade e risco ambiental à erosão/acreção sedimentar e taxas de inundação das praias expostas e/ou abrigadas e estuários, além de mapeamentos temáticos de precisão em escala regional.

Figura 4 – Modelo digital de elevação de trecho da Praia do Minhoto, em Guamaré/RN.



5 CONCLUSÕES

A metodologia enfocada na altimetria GNSS de precisão para aplicações em zonas costeiras, baseada em cálculo, modelagem e remoção da CS do modelo geoidal, foi avaliada em faixa litorânea de aproximadamente 150 km no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. Para isso, foi realizado o posicionamento GNSS em 14 RNs da RAFB, sendo 11 utilizadas na modelagem e remoção da

componente sistemática e 3 na avaliação da altimetria GNSS. As RNs foram posicionadas com precisões de $0,011 \pm 0,009$ m em N, $0,015 \pm 0,014$ m em E, e $0,032 \pm 0,031$ m em h.

A CS do modelo geoidal, calculada pela Equação (3), apresentou média de -0,492 m, DP de 0,087 m e EQM de 0,499 m. A média de -0,492 m comprovou a existência da CS, ou seja, mostrou que o modelo geoidal gravimétrico é incompatível ao sistema altimétrico local e não fornece alturas geoidais com acurácia compatível àquelas exigidas no nivelamento de precisão. O DP de 0,087 m mostrou que a CS possui relevante dispersão em torno da média, o que pode ser explicado pelo fato da CS variar em função da localização geográfica, não sendo considerada homogênea. Na modelagem da CS foram ajustados os coeficientes do modelo polinomial quadrático (Equação 5) pelo método dos mínimos quadrados. Após a modelagem e a remoção da CS, ainda restaram distorções nas alturas geoidais gravimétricas em relação ao sistema altimétrico local, a CR do modelo geoidal (Equação 8), com média nula, DP de 0,070m e EQM de 0,066 m. Contudo, a média nula confirmou a remoção da CS do modelo geoidal, assim como o DP de 0,070m e o EQM de 0,066 m confirmaram a boa acurácia das alturas geoidais, compatíveis ao sistema altimétrico, e o bom ajustamento da superfície modelada na CS.

A partir das RNs de controle externas ao modelo foram verificadas as discrepâncias das altitudes obtidas pela altimetria GNSS em relação às altitudes de referência, que revelaram média de 0,063 m, DP de 0,024 m e EQM de 0,066 m. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia empregada forneceu acurácia adequada à altimetria GNSS em inúmeras aplicações, entre elas o monitoramento costeiro de zonas costeiras sob a ação de alta dinâmica sedimentar devido à intensidade de forçantes físicas naturais. Nesse caso, se destaca os benefícios de eficiência, rapidez e baixo custo do emprego dessa metodologia quando comparadas aos métodos altimétricos convencionais.

Dessa forma, esse trabalho apresenta contribuições ao enfoque da altimetria GNSS e sugere estratégia metodológica em aplicações na zona costeira. Quanto à altimetria GNSS (Equação 7), a principal contribuição foi o cálculo de alturas geoidais com acurácia de poucos centímetros em relação ao sistema altimétrico local, uma vez que as altitudes geométricas podem ser determinadas de maneira relativamente simples e rápida pelo GNSS. Ao monitoramento costeiro, a acurácia obtida na altimetria GNSS tem permitido análises de precisão em extensas áreas costeiras (em escala regional) em reduzido intervalo de tempo, com a aplicação dos métodos cinemáticos do GNSS. Nesse caso, a altitude ortométrica de precisão relacionada ao SGB é de extrema importância por gerar modelos relacionados a um referencial preciso, fixo, unívoco e relativamente estável no tempo, o que permite o monitoramento ambiental de zonas costeiras em diferentes escalas espaciais e temporais.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada com recursos de projetos de pesquisa da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste no Monitoramento de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05 – PETROMAR, CTPETRO – FINEP / PETROBRAS / CNPq): Projetos Cooperativos HIDROSEMA, MOLECO e CRONALOG. As atividades foram desenvolvidas com o apoio logístico do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEOPRO/DG/UFRN), do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP/UFRN) e do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN). Os autores agradecem aos revisores pelas importantes contribuições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T.; SOUTO, M.V.S. *Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão*. Editora Natal, 118 p, 2012. ISBN 988-85-913746-0-1, 2012.
- AMARO, V. E. ; LIMA, F. G. F. ; SANTOS, M.S.T. An Evaluation of Digital Elevation Models to Short-Term Monitoring of a High Energy Barrier Island, Northeast Brazil. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 76, p. 317-324, 2013.
- BARBARELLA, M.; BARZAGHI, R.; DOMINICI, D.; FIANI, M; GANDOLFI, S. & SONA, G. A Comparison Between Itagleo'95 and GNSS/Leveling Data along the Coasts of Italy. *Phys. Chem. Earth*, v. 23, n.1, p. 81-86, 1998.
- BAPTISTA, P.; BASTOS, L.; BERNARDES, C.; CUNHA, T.; DIAS, J.A. Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGNSS — A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, v.24, n.6, p.1516-1528, 2008.
- BOAK, E.H. & TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, v.1, n.4, p.688-703, 2005
- COWART, L; WALSH, J.P; CORBETT, D.R. Analyzing Estuarine Shoreline Change: A Case Study of Cedar Island, North Carolina. *Journal of Coastal Research*, v.26, n.5, p.817-830, 2010.
- ESTEVES, L.S.; WILLIAMS, J.J.; DILLENBURG, S.R. Seasonal and Interannual Influences on the Patterns of Shoreline Changes in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v.22, n.5, p.1076-1093, 2006.
- FEATHERSTONE, W. E.– 1998a – Do we need a gravimetric geoid or a model of the Australian height Datum to transform GNSS heights in Australia. *The Australian Surveyor*, 43: 273-280.
- FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C. & KIRBY, J. F. – 1998b – Strategies for the accurated determination of orthometric heights from GNSS. *Survey Review*, 34:278-295.

- FOTOPOULOS, G. – 2003 – An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data. *Thesis*, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta.
- GONÇALVES, R.M.; COELHO, L.S.; KRUEGER, C.P. HECK, B. Modelagem preditiva de Linha de Costa utilizando redes neurais artificiais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 16, n.3, p.420-444, 2010.
- IBGE (FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). *Informações obtidas da página do IBGE na internet*: Disponível em <www.ibge.gov.br> Acesso: 01 janeiro 2013.
- KIAMEHR, R. – 2002 - Optimal fitting of GNSS/Levelling and FFT geoid in Iran, *NCC Geomatics 81 Conferences*, Tehran, Iran.
- KLEMAS, V. – 2011 - Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. *Journal of Coastal Research*, v. 27, n. 2, p. 2-17, 2011.
- KOTSAKIS, C. & SIDERIS, M.G. – 1999 – On the adjustment of combined GNSS/levelling/geoid networks. *Journal of Geodesy*, 73: 412-421.
- LACY, M.C.; RODRÍGUEZ-CADEROT, G.; MARÍN, E.; RUIZ, A; BORQUE, M.J.; GIL, A.J. & BIAGI, L. – 2001 – A gravimetric geoid computation and comparison with GNSS results in Northern Andalusia (SPAIN). *Studia geoph. Et geod.*, 45: 55-66.
- MATOS, A.C.O.C; BLITZKOW, D.; GUIMARÃES, G.N.; LOBIANCO, M.C.B.; COSTA, S.M.A. Validação do MAPGEO2010 e comparação com modelos do geopotencial recentes. *Bol. Ciênc. Geod.*, sec. Artigos, Curitiba, v. 18, no 1, p.101-122, jan-mar, 2012
- MOLINA, E.C. – 1999 – Avaliação preliminar do modelo geopotencial EGM96 no território brasileiro. *International Geoid Service – Special Issue for South America*, pp 63-78
- MONICO, J.F.G; PÓZ, A.P.D.; GALO, M.; SANTOS, M.C.D; OLIVEIRA, L.C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*. V.15,n.3,p.469-483, 2009.
- MONICO, J.F.G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora Unesp, p.477, 2007.
- MOORE, L.J.; RUGGIERO, P., LIST, J.H. Comparing Mean High Water and High Water Line shorelines: Proxy Datum Offsets be Incorporate into shoreline Change Analyses. *Journal Of Coastal Research*, v.22, p. 894-905, 2006.
- NUNES, V. C. – 2012 – Testes sobre a eficiência do modelo do geopotencial EGM2008 na Cidade de Porto Alegre. *Dissertação de Mestrado*, Centro de estudos e pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Rio Grande do Sul, UFRGS 96pp.
- OLLIKAINEN, M. – 1998 – Accuracy of GNSS levelling. The XIII General Meeting of the Nordic Geodetic Commission. *Anais 1*: 25-29, Gävle, Sweden.

- ROMAN, D.R.; Wang, Y.M.; Henning, W. & Hamilton, J. – 2004 – Assessment of the New National Geoid Height Model, GEOID03. *Technical Papers of the 2004 ACSM/TAPS Conference and Technology*, Tennessee, April 16-21.
- ROCHA, C.P.; ARAÚJO, T.C.M.; MENDONÇA, F.J.B. Methodology for Location of Shorelines using 3D-GNSS Positioning: A Case Study at Sauaçui Beach, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research*. Jul 2009, v.25, n.4, p.1052-1058, 2009.
- SÁ, N.C.de – 2004 - O campo de gravidade, o geóide e a estrutura crustal na América do Sul. *Tese de Livre Docência*. Departamento de Geofísica do IAG-USP, São Paulo, 121 pp.
- SÁ, N.C.de & MOLINA, E.C. – 1995 – O geóide gravimétrico no Estado de São Paulo: resultados preliminares. *XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Salvador, Anais 1*: 124-133.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E. 2011. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 17, n. 4, p.571-585.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E.; SOUTO, M.V.S. 2011. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, edição especial Geodésia e Topografia.
- SANTOS, M.S.T.; SÁ, N.C de. 2006. O uso do GNSS em levantamentos geofísicos terrestres. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.24, n.1, p.63-80.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications*. Walter de Gruyter, N. York, p.531, 1993.
- SOUTO, M.V.S.; CASTRO, A.F.; GRIGIO, A.M.; AMARO, V.E.; VITAL, H. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. *Journal of Coastal Research*, v.39, p.1618-1621, 2004.
- SOUZA, S.F. de. – 2002 – Contribuição do GNSS para o aprimoramento do geóide no Estado de São Paulo. *Tese de Doutorado*, Curso de pós-graduação em Geofísica do IAG/USP, São Paulo, 204pp.
- TOTH, G.Y.; RBZSA, S.Z.; ANDRITSANOS, V.D.; ADIM, J. & TZIAVOS, I.N. – 2000 – Towards a cm-Geoid for Hungary: Recent Efforts and Results. *Phys. Chem Earth (A)*, Vol. 25, No 1. pp 47-52.

(Recebido em agosto de 2013. Aceito em Agosto de 2013).