

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N<sup>o</sup> 66/1: 167-184  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **GEODÉSIA APLICADA À INTEGRAÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS E BATIMÉTRICOS NA CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE PRAIA**

*Applied Geodesy to Integration of Topographic and Bathymetric Data in the Characterization of Beach Surfaces*

**Anderson Targino da Silva Ferreira<sup>1</sup>; Venerando Eustáquio Amaro<sup>1</sup>  
& Marcelo Soares Teles Santos<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN**  
**Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra**  
**Departamento de Geologia, Laboratório de Geoprocessamento - GEOPRO**  
Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970 - Natal, RN - Brasil - Caixa-Postal: 1596.  
amaro@geologia.ufrn.br, andersontsferreira@gmail.com

**<sup>2</sup>Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB**  
**Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CETEC**  
Rua Rui Barbosa, 710 Centro, CEP 44380-000 - Cruz das Almas, BA – Brasil; Telefone: (075) 36212350.  
mstsantos@yahoo.com.br

*Recebido em 20 de Agosto, 2013/ Aceito em 02 de Fevereiro, 2014*  
*Received on August 20, 2013/ Accepted on February 02, 2014*

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para levantamento, geração e avaliação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de superfícies praias (setores emersos e submersos) de litorais arenosos a partir da integração de dados topográficos e batimétricos *in situ*, georreferenciados com precisão decimétrica, compatível aos estudos geomorfológicos da dinâmica costeira de curto prazo. A metodologia desenvolvida consiste em: a) levantamento topográfico da porção emersa da praia com o emprego do método de posicionamento relativo cinemático utilizando os Sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) com apoio de um quadriciclo motorizado; b) levantamento batimétrico da porção submersa do perfil praias, apoiado por embarcação equipada com ecossonda e receptor GNSS, operando em modo relativo cinemático; e, c) integração de dados de levantamentos topográficos e batimétricos para obtenção de MDE mais realista do perfil de praia. Os posicionamentos GNSS envolvidos nos levantamentos topográficos e batimétricos foram executados em relação às estações de controle da rede geodésica implantada para a área de estudo, que fornecem referencial geodésico vinculado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), o qual é unívoco, fixo e relativamente estável no tempo. A metodologia foi aplicada para a praia de Ponta Negra, Região Nordeste do Brasil, caracterizada pela intensa ocupação humana e drástica erosão costeira, que oferece uma demanda motivadora para a potencialidade do procedimento proposto, relacionada à produtividade dos levantamentos e à precisão dos resultados, sem dúvida, provando o progresso alcançado em comparação com os métodos clássicos de levantamento de perfis completos de praia.

**Palavras chaves:** GNSS, MDE, Levantamentos Topobatimétrico.

## ABSTRACT

This work presents a methodology developed for survey, generation and evaluation of Digital Elevation Models (DEM) of beach surfaces (emerged and submerged sectors) of sandy coastlines from the integration of topographic and bathymetric data in situ, georeferenced with decimeter accuracy compatible to coastal geomorphological dynamics of short-term studies. The methodology consists of: a) surveying the onshore portion of the beach following the method of kinematic relative positioning using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) with the help of a motorized quadricycle; b) bathymetric survey of the submerged portion of the beach profile supported by vessel equipped with echo sounder and GNSS receiver operating in kinematic relative mode; and c) data integration of topographic and bathymetric surveys to obtain more realistic DEM beach profile. The GNSS positioning involved in topographic and bathymetric surveys were executed relative to control stations of the geodetic position network to the study area, providing geodetic reference to Geodetic Brazilian System (GBS), which is univocal, fixed and relatively stable over time. The methodology was applied to Ponta Negra Beach, northeast Brazil, characterized by intensive human occupation and coastal erosion, offering a motivating demand to the potentiality of the proposed procedure related to survey productivity and accuracy of results, doubtless proving a progress achieved compared to classical methods of surveying entire beach profiles.

**Keywords:** GNSS, DEM, Topobathymetric Surveys.

## 1. INTRODUÇÃO

Classicamente, o monitoramento terrestre de zonas de praia era realizado a partir de perfis topográficos dispostos perpendicularmente às Linhas de Costa (LC) e sobre os quais eram calculados os recuos ou avanços das LC, com o objetivo de identificar áreas de acreção ou erosão (LIMA, 2004; CHAVES, 2005). No entanto, fatores ambientais dinâmicos, como variação de maré e clima, de ondas e ventos, não permitiam que o perfil fosse levantado por terra até a profundidade de fechamento, que corresponde ao limite em mar da movimentação significativa de sedimentos (HALLERMEIER, 1978; 1981). Para o conhecimento das feições submersas da zona de praia, portanto, era realizado o levantamento batimétrico, que tinha referencial diferente do levantamento topográfico, o que inviabilizava a integração dos produtos gerados.

Com o avanço e proliferação das técnicas espaciais de posicionamento, especialmente o GPS (*Global Positioning System*), os métodos topográficos clássicos (poligonação, nivelamento geométrico, etc.) foram substituídos pelo espacial, com os benefícios da precisão, simplicidade operacional, rapidez e baixo custo (BAPTISTA *et al.*, 2008; ROCHA *et al.*, 2009; GONÇALVES *et al.*, 2010; TANAJURA *et al.*, 2011; SANTOS, 2011; AMARO *et al.*, 2012a). A partir dessa técnica, cada vez mais precisa e rápida, tornou-se possível a realização de levantamentos topográficos e batimétricos georeferenciados e de precisão. No entanto,

tais levantamentos ainda eram realizados separadamente e em referenciais geodésicos diferentes, como exemplo citam-se alguns levantamentos topográficos georeferenciados (BOAK & TURNER, 2005; MOORE *et al.*, 2006; ESTEVES *et al.*, 2006; BAPTISTA *et al.*, 2008; ROCHA *et al.*, 2009; GONÇALVES *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2012) e batimétricos (NOAA OCS, 1976; IHO, 2008; MB DHN, 2011; NOAA OCS, 2013a; 2013b). Algumas estratégias de levantamentos integrados entre altimetria e batimetria já foram apontadas por Muehe (1996) e Belligotti & Muehe (2012). No entanto, a execução de levantamentos com a ausência de referenciais fixos, unívocos e relativamente estáveis no tempo dificultou, em ambas as estratégias, a amarração vertical e, portanto, a integração dos levantamentos da porção submersa com aqueles da porção emersa da zona de praia.

Este artigo apresenta uma metodologia desenvolvida para levantamento, geração e avaliação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de superfícies praias, associando os setores emersos e submersos em litorais arenosos a partir da integração de dados topográficos e batimétricos mensurados *in situ* e georeferenciados com precisão decimétrica, compatível aos estudos de geomorfologia e dinâmica costeira de curta duração. A metodologia desenvolvida consiste em: a) levantamento topográfico da porção emersa da praia com o emprego do método de posicionamento relativo cinemático utilizado nos Sistemas GNSS (*Global*

*Navigation Satellite Systems - Sistema Global de Navegação por Satélite*), com apoio de um veículo motorizado; b) levantamento batimétrico da porção submersa do perfil praiial, apoiado por embarcação dotada de uma ecosonda e de receptor GNSS, capaz de operar no modo relativo cinemático; e, c) integração geoespacial dos produtos topográficos e batimétricos na composição da superfície praiial nos setores emerso e submerso.

Entretanto, os levantamentos e os processamentos para integrações dos resultados com precisão decimétrica requerem a criação de uma infraestrutura geodésica de referência nas regiões de interesse que forneçam bases curtas de poucos quilômetros ao posicionamento relativo cinemático do GNSS, além da precaução com logística de campo eficiente que possibilite os citados benefícios do posicionamento georreferenciado. Tal infraestrutura consiste em estações geodésicas implantadas ao longo da área de estudo, posicionadas com precisão e materializadas de forma definitiva, as quais devem possuir coordenadas e altitudes conhecidas, servindo de referência aos levantamentos planialtimétricos.

A partir da metodologia proposta tornou-se possível a realização de levantamentos topográficos e batimétricos georreferenciados ao mesmo referencial geodésico, o que permitiu a integração dos levantamentos no setor emerso e submerso na composição do perfil de praia. O georreferenciamento de alta precisão dos perfis de praia permite a comparação multitemporal de levantamentos sistematicamente realizados ao longo de curta escala de tempo, com a possibilidade da identificação e mensuração da variação da LC, do cálculo das áreas em erosão e acresção, do cálculo do volume e da orientação do transporte de sedimentos ao longo dos setores praiiais. Nesse caso, a metodologia proposta apresenta ainda a vantagem da cobertura espacial de extensas áreas, visto que os levantamentos por perfis de praia somente forneciam informações pontuais da dinâmica das praias e por isso pouco representativa da complexidade da dinâmica costeira e insuficiente para o cálculo de áreas e volumes de erosão e/ou acresção em extensões quilométricas de praias.

## **2. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO E DO MODELO GEOIDAL DE REFERÊNCIA**

Este item apresenta a área do estudo de caso, a rede geodésica de referência, que serviu de apoio básico aos levantamentos geodésicos, e o modelo geoidal utilizado na altimetria por GNSS.

### **2.1. Área de estudo**

A Praia de Ponta Negra localiza-se na faixa sedimentar denominada de Bacia Pernambuco-Paraíba. Esta região do Litoral Oriental do RN é composta por rochas sedimentares do Cretáceo, recobertas por rochas do Grupo Barreiras e sedimentos Quaternários, como dunas, terraços marinhos e aluvionares e coberturas arenosas diversas. As principais feições geomorfológicas encontradas são praias arenosas relativamente planas e estreitas, falésias ativas, tabuleiros costeiros, campos de dunas móveis e vegetadas, linhas de recifes de arenitos de praia (*beachrocks*) e planícies flúvio-estuarinas (VITAL, 2006).

No setor oriental do RN é marcante o controle estrutural exercido pelos lineamentos tectônicos do embasamento Pré-cambriano, desenvolvidos desde o final do Ciclo Brasileiro, sobre a geometria dos canais fluviais e o sentido de escoamento dos principais rios da região (AMARO, 1998; JARDIM DE SÁ *et al.*, 1999; BRITO NEVES *et al.* 2004). Assim, os baixos cursos dos vales fluviais ocorrem encaixados em *grabens* e *semi-grabens* gerados pela reativação de zonas de cisalhamento transcorrentes de direções gerais NE e NW (AMARO, 1998; AMARAL, 1999; BEZERRA *et al.*, 1999, 2001, 2003). Esta característica morfotectônica na zona costeira expõe o condicionamento da sedimentação quaternária em depressões tectônicas, que inclui a denudação de depósitos sedimentares do Grupo Barreiras nos *horsts* adjacentes (MAIA & BEZERRA 2011) e a erosão areolar conduzida pelos rebaixamentos do nível do mar ocorridos no Cenozoico (BEZERRA *et al.* 2001).

Na Praia de Ponta Negra uma evidente situação erosiva prossegue por décadas e os esforços de remediação tem sido ineficazes no controle da erosão (AMARO *et al.* 2013). Um dos

fatores da erosão intensa decorre provavelmente dos padrões de refração e difração de ondas muito específicas, que promovem erosão diferenciada nos sedimentos do Grupo Barreiras, devido à direção persistente de aproximação de ondas (DINIZ, 1998; DINIZ E DOMINGUEZ, 1999). O clima é o Litorâneo do Nordeste Oriental (3b) fortemente influenciado pelas massas de ar úmidas provenientes do Oceano Atlântico com 3 a 5 meses secos no verão e chuvosos no inverno (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007). Os ventos predominantes possuem uma direção de sudeste, variando sazonalmente entre ESE e SSE, com velocidades de 3,8 e 9 m/s, gerando uma deriva litorânea, que durante quase todo o ano transporta sedimentos no sentido de S para N. Esta parte do litoral é dominada por ondas de energia mista e correntes costeiras longitudinais. As ondas apresentam de 0,2 a 1,5 m de altura na zona de arrebentação e correntes costeiras em torno de 0,1 a 0,8 m/s quase sempre no sentido de sul para norte (DINIZ E DOMINGUEZ, 1999; CHAVES, 2000; SOUZA, 2004).

Dados de ondas e correntes registradas na área abrigada próxima ao Morro do Careca, na Praia de Ponta Negra, observaram valores médios de velocidade de corrente de 0,05 m/s, com máximos de 0,10 m/s ocorrendo entre os quadrantes NO e NE nas marés de vazante e E-W na enchente. A altura significativa média das ondas observadas nessa mesma área foi de 0,78 m, oscilando entre 0,54-0,97 m, com suas direções variando desde sudeste até nordeste e período de pico médio com cerca de 4,24 s (AMARO *et al.*, 2012b). Ao largo foi observada alturas significativas com valores médios de 1,21 m e direções preferenciais de E-ESE com período médio de 6,2 s (HIDROCONSULT, 1979; Tavares Junior, 1980). Sendo que, através do Sistema de Modelado Costeiro (SMC) desenvolvido por Gonzales *et al.*, (2007) e sua aplicação no Brasil (SMC-Brasil, 2013), esses valores médios de alturas significativas de ondas ficaram em torno de 0,78-1,25 metros, preferencialmente de ENE.

## 2.2. Rede geodésica de referência

A Rede Geodésica do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte (doravante apenas RGLO), implantada e mantida pelo Laboratório

de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da UFRN (GEOPRO/DG/UFRN), é constituída por quatro estações geodésicas distribuídas em aproximadamente 10 km de litoral (Fig. 1). As estações foram distribuídas próximas aos principais trechos de interesse dos levantamentos costeiros, apresentando a seguinte distribuição: duas estações no trecho da Praia de Ponta Negra: a EST-01 e EST-02; uma no trecho da Via Costeira: EST-03; e a última na praia de Areia Preta: EST-04. A distribuição geográfica das estações que formam a RGLO foi escolhida visando possibilitar a formação de linhas de base curtas (poucos quilômetros) entre elas e as trajetórias a serem percorridas pelos receptores GNSS utilizados nos posicionamentos da área de estudo (apresentados no Capítulo 3).

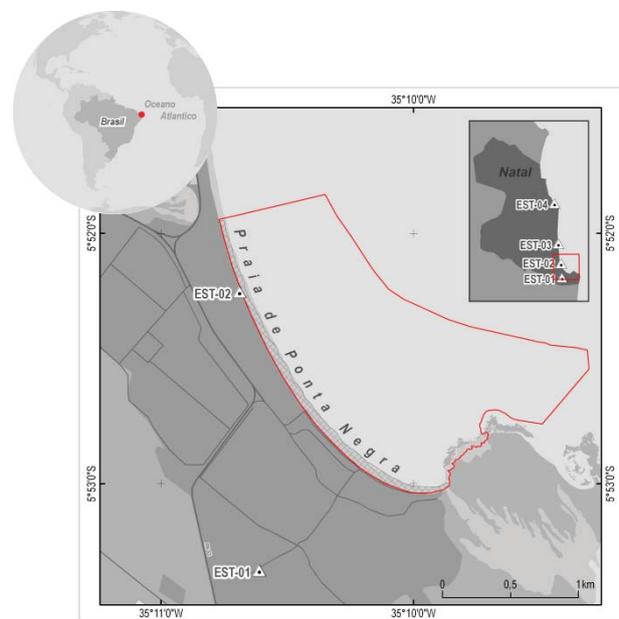


Fig.1 - Área de estudo em trecho da Praia de Ponta Negra, em Natal/RN, com a localização das estações da Rede Geodésica de Referência do Litoral Oriental do RN (RGLO).

Em cada estação da rede foram determinadas as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) e a altitude ortométrica referenciadas ao SGB. As coordenadas geodésicas foram determinadas com o posicionamento GNSS pelo método relativo estático a partir das estações RNNA (Natal/RN), RNMO (Mossoró/RN) e RNCG (Campina Grande/PB) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), no sistema geodésico SIRGAS2000. Devido às linhas de base de cen-

tenas de quilômetros, foram adotadas sessões de 4 horas de observações em cada estação. As altitudes ortométricas foram determinadas com a altimetria por GNSS no modo relativo, conforme metodologia estabelecida por Santos & Amaro (2011) usando, como referências, duas Referências de Nível (RRNN) da Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB), localizadas nas proximidades da área de estudo, e o modelo geoidal disponibilizado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), modelo MAPGEO2010 (IBGE, 2012). Como resultados dos processamentos de dados GNSS, as coordenadas geodésicas das estações tiveram erros padrões com média de 0,010 m em N, 0,010 m em E, e 0,028 m em h (altitude geométrica). As altitudes ortométricas tiveram erros com média de 0,048 m em relação às RRNN da RAFB do SGB. Mais informações sobre a metodologia de implantação de estações geodésicas de referência podem ser encontradas em Santos & Amaro (2011).

## **2.2 Modelo geoidal de referência**

Na altimetria por GNSS foram utilizadas as alturas geoidais obtidas no modelo geoidal desenvolvido e disponibilizado pelo IBGE em conjunto com diversas instituições do Brasil, o MAPGEO2010 (IBGE, 2012). O modelo geoidal, que possui resolução espacial de 5' de arco, foi determinado pela fórmula de Stokes, usando dados do modelo geopotencial EGM2008, dados gravimétricos terrestres, oceânicos, de satélites e dados topográficos na forma digital. No modelo, as alturas geoidais foram obtidas a partir das coordenadas geodésicas dos pontos de interesse, em SIRGAS2000. O programa pode ser obtido no site do IBGE (IBGE, 2012). A avaliação dos erros absolutos e relativos obtidos do modelo geoidal foi descrita por Santos & Amaro (2011). Estes autores observaram que em termos relativos, os erros obtidos foram de 1 mm/km a 5 mm/km. Portanto, para as linhas de base utilizadas nos levantamentos, entre as estações da RGLO e a linha de costa (inferiores a 3,5 km), têm-se um erro nominal de 3,5 mm a 17,5 mm nas diferenças de alturas geoidais. Mais detalhes sobre avaliação de modelos geoidais podem ser encontrados em Amaro *et al.* (2012a), Santos & Amaro (2011), Kotsakis & Sideris (1999) e Featherstone *et al.* (1998).

## **3. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA**

A metodologia proposta consiste em composição e representação de zonas de praia pela integração de levantamentos topográficos e batimétricos, respectivamente, do setor emerso e do setor submerso na sua porção máxima (Fig.2). Para isso, o MDE da zona de praia emersa e submersa é gerado a partir de pontos amostrais topográficos e batimétricos com coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas determinadas em relação aos mesmos referenciais geodésicos (materializados pela rede geodésica implantada), os quais são fixos, unívocos e relativamente estáveis no tempo. Isso permite a integração e comparação dos resultados de pesquisas em épocas e áreas diferentes (domínios temporal e espacial) e a conversão para outros tipos de referenciais. Tais características serão consideradas na metodologia descrita a seguir.

### **3.1 Aquisição de dados**

Na metodologia proposta à aquisição de dados para a geração de MDE de zonas de praia é feita em duas etapas: o levantamento topográfico da porção emersa e o levantamento batimétrico da porção submersa (Fig. 2).

#### **3.1.1 Métodos de posicionamento e altimetria GNSS**

As coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) dos pontos amostrais topográficos e batimétricos foram determinadas com o posicionamento GNSS no método relativo cinemático pós-processado, no qual dois receptores coletam dados, simultaneamente, durante um determinado intervalo de tempo, sendo um instalado em uma estação de referência (estação base, de coordenadas conhecidas) e o outro nos pontos de interesse (estações móveis) (SEEBER, 1993; MONICO, 2007). Os dados rastreados são armazenados nos receptores e, posteriormente, transferidos para o computador, onde são processados e ajustados (no estudo de caso, no software TopconToos, da Topcon). Como referência aos posicionamentos foi utilizada a estação geodésica implantada na área de estudo (EST-01), que forneceu linhas de base curtas em toda a área de estudo. Os receptores utilizados nas estações móveis foram do modelo *Trimble*

R3, que rastreiam observações da fase da onda portadora na frequência L1 e possuem precisão nominal horizontal de 5 mm + 1 ppm e vertical de 5 mm + 2 ppm. Na estação base foi utilizado o modelo Trimble 5700 com precisão nominal horizontal de ±5 mm + 0,5 ppm e vertical de ±5 mm + 1 ppm., que rastreia observações da fase da onda portadora nas frequências L1 e L2.

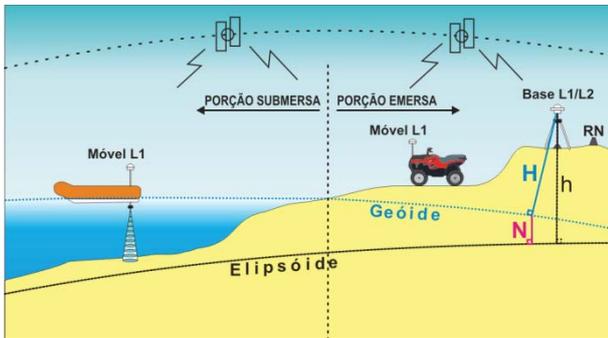


Fig. 2 - Ilustração da metodologia aplicada na integração de levantamentos topográficos e batimétricos na Praia de Ponta Negra, Natal/RN.

As altitudes geométricas ( $h_i$ ) (relacionadas ao elipsóide de referência adotado no sistema SIRGAS2000) obtidas com GNSS são convertidas nas ortométricas ( $H_i$ ) (nível médio do mar) através da altimetria com GNSS (Fig.3). Consiste em determinar a altitude ortométrica de um ponto de interesse ( $i$ ) em relação a, pelo menos, uma estação de referência ( $A$ ), de coordenadas geodésicas ( $\alpha_A, \lambda_A, h_A$ ) e altitude ortométrica ( $H_A$ ) conhecidos. Isso é feito através das diferenças de altitudes geométricas ( $\Delta h_i = h_i - h_A$ ), determinadas com GNSS, e das diferenças de alturas geoidais ( $\Delta N_i = N_i - N_A$ ), determinadas a partir de um modelo geoidal (OLLIKAINEN, 1998; FEATHERSTONE *et al.*, 1998; SANTOS *et al.*, 2011; SANTOS & AMARO, 2011):

$$H_i = H_A + \Delta H_i = H_A + (\Delta h_i - \Delta N_i) \quad (1)$$

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados, as altitudes ortométricas ( $H_i$ ) dos pontos amostrais topográficos e batimétricos são calculadas a partir de várias estações de referência da área de estudo. Assim, para cada ponto amostral foi obtido um conjunto de altitudes ortométricas  $\{H_1, H_2, H_3, \dots, H_m\}$

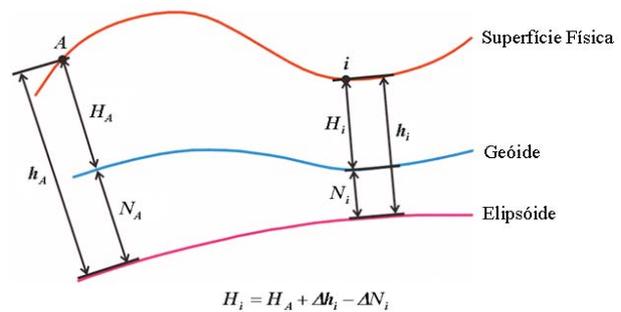


Fig. 3 - Modelo da altimetria por GPS.

A altitude ortométrica de cada estação foi determinada por meio da média aritmética das obtidas pelas estações de referência:

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n} \quad (2)$$

Onde,  $n$  é o número de estações de referência utilizadas. Como referências à altimetria por GNSS foram utilizadas estações da rede geodésica implantada na área de estudo, as quais possuem coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas conhecidas, e o modelo geoidal gravimétrico do IBGE, modelo MAPGEO2010 (IBGE, 2012). No cálculo das altitudes ortométricas foi utilizado o aplicativo desenvolvido em Santos (2011), que calcula a altitude de um ponto pela média aritmética das altitudes calculadas pelas estações de referência mais próximas.

### 3.1.2 Levantamentos topográficos

Os levantamentos topográficos do setor emerso foram realizados com intuito de coletar pontos topográficos planialtimétricos em perfis representativos das feições morfológicas geralmente encontradas no setor emerso de zonas de praia, ou seja, a face de praia emersa e qualquer outra feição morfológica com variação topográfica significativa do terreno, tal como dunas frontais e cúspides. Como em Santos *et al.*, (2011), os perfis foram coletados com caminhamentos ao logo das feições morfológicas e cruzando-as, podendo ser orientados nas formas longitudinais, transversais e/ou inclinados em relação às Linhas de Costa. Para aumentar a produtividade na aquisição de dados e viabilizar o levantamento de extensas áreas em reduzidos intervalos de tempo, o receptor GNSS móvel foi acoplado a um quadriciclo motorizado. O procedimento para rastreamento consistiu em fixar o

bastão com a antena do receptor GNSS sobre o veículo; nivelar a antena com o nível de bolha do bastão; medir a altura da antena, corrigida da distância vertical do quadriciclo ao solo; e programar o receptor. O receptor móvel (Trimble R3) foi programado para coletar dados no modo cinemático em função do tempo e com intervalo de gravação de dados de 1s.

### 3.1.3 Levantamentos batimétricos

Os levantamentos batimétricos do setor submerso foram realizados com intuito de coletar pontos topográficos planialtimétricos em perfis representativos das feições morfológicas geralmente encontradas nas áreas submersas, ou seja, bancos longitudinais ou transversais e cavas. Os perfis foram coletados com caminhamentos longitudinais e transversais à LC, com espaçamento entre linhas batimétricas de aproximadamente 50 m. A embarcação, do tipo inflável, foi equipada com uma ecossonda portátil da GARMIN modelo *GPSMAP 421s*, além do receptor GNSS. A sonda foi programada com intervalo de gravação de 5 segundos e frequência de 200 kHz, com resolução do feixe vertical de 0,01m e capaz de medir profundidades de até 457m. O receptor GNSS móvel foi programado para coletar dados no modo cinemático em função do tempo e com intervalo de gravação de dados de 1s.

No levantamento batimétrico, cada ponto amostral do receptor GNSS fornece as coordenadas geodésicas (latitude e longitude e altitude geométrica) e o horário da coleta de dados ( $T_{GNSS}$ ) (a altitude ortométrica é calculada a partir da geométrica pela Equação 3). Por outro lado, cada ponto amostral do ecobatímetro fornece a profundidade do nível da água ( $P$ ) e o horário da coleta ( $T_{BAT}$ ) de dados. A partir da combinação dos horários das coletas de dados topográficas e batimétricos é realizada a integração dos produtos com objetivo de calcular a altitude ortométrica do nível do terreno ( $H_{TER}$ ) ou assoalho, pela seguinte relação (Fig.4):

$$H_{TER} = H_{GNSS} - h_{ANT} - h_{OFF} - P \quad (3)$$

Onde,  $H_{GNSS}$  é a altitude ortométrica da antena GNSS,  $h_{ANT}$  é a altura da antena (distância vertical entre a antena e o fundo do

bote), e  $h_{OFF}$  é o *offset* do sensor (distância vertical entre o fundo do bote e o ponto de medição do sensor do ecobatímetro).

A integração dos dados topográficos emersos e batimétricos submersos foi realizada no *software* ArcGIS, versão 10, da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). O procedimento para coleta de dados consiste em fixar o bastão com a antena do GPS sobre o suporte da embarcação, localizado na parte traseira; nivelar a antena com o nível de bolha do bastão; medir a altura da antena e o *offset* do sensor do ecobatímetro; e programar o receptor GNSS móvel e o ecobatímetro.

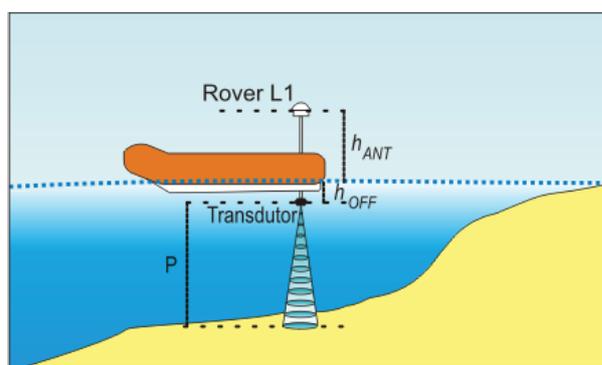


Fig.4 - Princípio do levantamento batimétrico.

### 3.2 Geração e controle de qualidade de Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Na geração do MDE (a partir de dados de topografia e batimetria) foi utilizada a interpolação por triangulação com uso da técnica TIN (*Triangulated Irregular Network*), que, segundo avaliações de Amaro *et al.*, (2013b), é o método mais indicado para representação de zonas de praia. Consiste numa estrutura em que pontos cotados com distribuição irregular (ou regular) são conectados por uma rede de arestas que formam triângulos não sobrepostos, e entre eles os valores são interpolados linearmente. Com este procedimento, as curvas de nível (isolinhas) são traçadas a partir da disposição original dos dados. Não ocorre extrapolação e as estimativas limitam-se à área resultante da soma das áreas dos triângulos (MATOS, 2005; ZANARDI, 2006). Os pontos foram conectados de acordo com a triangulação de Delaunay que usa o critério da maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Assim, a malha final deve conter triângulos mais próximos possível de

equiláteros, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos. Para aplicar o método TIN com a triangulação de Delaunay, foi utilizado o *software* ArcGIS versão 10, da ESRI. Mais detalhes sobre os processos de interpolação podem ser encontrados em Matos (2005), Zanardi (2006) e Amaro *et al.* (2013b).

O controle de qualidade, que avalia a sensibilidade do modelo em representar feições morfológicas praiais, foi realizado de maneiras distintas nos MDE topográficos e batimétricos. O controle de qualidade do MDE topográfico foi realizado a partir do cálculo das discrepâncias das altitudes ortométricas obtidas no modelo analisado ( $H_i^m$ ) e as de referência ( $H_i^r$ ), pela expressão:

$$\Delta H_i = H_i^m - H_i^r \quad (4)$$

Em amostras com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  pontos de controle selecionadas aleatoriamente na área de estudo e que não foram usados na geração dos modelos. Para o conjunto de discrepâncias ( $\Delta H_i$ ) das altitudes, a medida de acurácia foi dada pelo Erro Quadrático Médio (EQM, em inglês *Mean Square Error MSE*), conforme a equação (MONICO *et al.*, 2009):

$$EQM = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta H_i^2}{n}} \quad (5)$$

No MDE batimétrico o controle de qualidade foi realizado pelo cálculo das discrepâncias entre as altitudes obtidas no MDE topográfico e no MDE batimétrico, em pontos amostrais da área de sobreposição dos levantamentos. Para garantir a sobreposição e permitir a avaliação da batimetria, o levantamento topográfico a foi executado em baixamar e o levantamento batimétrico em preamar, ambos em uma mesma maré.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Características da amostragem e controle de qualidade dos modelos

A Fig.5 apresenta mapa com os pontos amostrais topográficos (laranjas) e batimétricos (azuis) levantados no estudo de caso realizado na Praia de Ponta Negra, no período entre 30

de outubro e 04 de novembro de 2012. A Fig.6 ilustra o MDE obtido pela interpolação dos pontos amostrais levantados no estudo de caso, representado no sistema de projeção plana UTM (Fuso 25) e no Sistema de Referência Geodésico SIRGAS2000. As curvas de nível foram geradas com equidistância vertical de 0,5 m. Para melhorar a visualização dos modelos foi aplicada uma tabela de cores com variações de 0,5m, do azul claro (altitude ortométrica maior) ao azul escuro (altitude ortométrica menor).



Fig.5 - Mapa da área de estudo com a distribuição dos pontos amostrais topográficos (laranja) e batimétricos (azuis) levantados em campo.

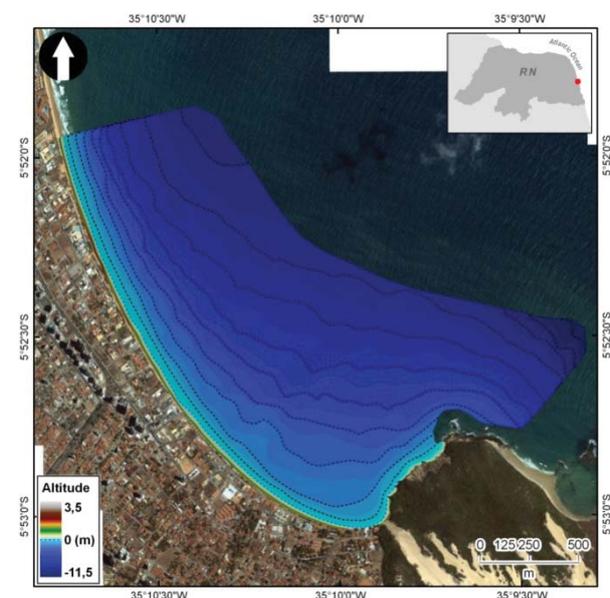


Fig.6 - Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela integração dos levantamentos topográficos e batimétricos.

No levantamento topográfico, a área emersa de 206.365,21m<sup>2</sup> foi medida com 4.209 pontos amostrais em aproximadamente 1,16 h, resultando numa taxa de aquisição de aproximadamente 60 pontos por minuto. No levantamento batimétrico, a área submersa de 2.571.766,21 m<sup>2</sup> foi medida com 8.161 pontos amostrais em aproximadamente 11,3h, resultando numa taxa de aquisição de aproximadamente 12 pontos por minuto. Os pontos amostrais topográficos tiveram precisões com média de 0,013 m e desvio padrão de 0,006 m em N, média de 0,024 m e desvio padrão de 0,002 m em E, e média de 0,022 m e desvio padrão de 0,002 m em h. Os pontos batimétricos tiveram precisões com média de 0,020 m e desvio padrão de 0,030 m em N, média de 0,044 m e desvio padrão de 0,070 m em E, e média de 0,047 m e desvio padrão de 0,080 m em h. As altitudes ortométricas (Equação 2) dos pontos amostrais, calculadas a partir das duas estações de referência ilustradas na Fig.1 e com o modelo geoidal MAPGEO2010, tiveram desvio padrão de 0,048 m.

Os resultados despontam também que as coordenadas geodésicas e as altitudes ortométricas dos pontos amostrais topográficos e batimétricos, obtidas com alta produtividade, tiveram precisão de poucos centímetros em relação à rede geodésica implantada na área de estudo, a qual é vinculada ao SGB. A precisão absoluta decimétrica em relação a um referencial geodésico unívoco, fixo e relativamente estável no tempo implica em precisão relativa também decimétrica entre as coordenadas e altitudes dos pontos topográficos e batimétricos levantados na área de estudo, mesmo coletados em momentos distintos.

No controle de qualidade do MDE topográfico, que avalia a acurácia da modelagem digital de elevação, as discrepâncias entre as altitudes do modelo e as de referência, em 10 pontos de controle externos ao modelo, tiveram média de -0,010 m, desvio padrão de 0,029 m e erro médio quadrático de 0,047 m. Isso mostra a sensibilidade do MDE em representar feições morfológicas praias com dimensões decimétricas. No controle de qualidade do MDE batimétrico, que avalia a separação entre o MDE topográfico e o MDE batimétrico, as discrepâncias entre as altitudes ortométricas da batimetria e da topografia, em 50 pontos de

controle localizados em zonas de sobreposição dos levantamentos, tiveram média de -0,073 m e DP de 0,087 m. Portanto, as altitudes ortométricas dos pontos amostrais batimétricos tiveram discrepância decimétrica em relação aos pontos amostrais topográficos, o que indica que a integração dos levantamentos foi realizada com acurácia adequada à composição dos perfis altimétricos da zona de praia para aplicações de monitoramento costeiro em diversas aplicações.

## **4.2 Potencialidades do MDE integrado da superfície praial**

### **4.2.1 Alcance da profundidade de fechamento dos perfis**

Em relação ao método tradicional de levantamento de perfil praial, a metodologia proposta apresenta a vantagem de gerar perfis de praia completos até no mínimo a profundidade de fechamento, de grande relevância em estudos de dinâmica e engenharia costeira. A profundidade de fechamento  $h_e$  é dada por:

$$h_e = 1,57 H_e \quad (6)$$

Onde,  $H_e$  é a altura significativa efetiva de onda.

Birkemeier (1985), através de uma versão simplificada, obteve a altura significativa efetiva da onda por ( $H_e$ ):

$$H_e = \bar{H} + 5,6 \sigma_H \quad (7)$$

Onde,  $\sigma_H$  é o desvio padrão da altura significativa de onda  $\bar{H}$  é a média das alturas significativas ao longo de um ano e  $\sigma_H$  é o desvio padrão das alturas significativas (Dean, 2002).

Na área de estudo, a profundidade de fechamento foi calculada a partir das estatísticas de ondas geradas através do modelo de longo prazo do Sistema de Modelado Costeiro (SMC-Brasil, 2013) e os valores encontrados foram de 3,57 metros, 3,73 metros e 4,05 metros para os perfis A, B e C da Fig.8, respectivamente. Portanto, os intervalos de altitudes ortométricas apresentados na Fig.6 mostram que o MDE cobriu todo o intervalo de profundidade de fechamento.

## 4.2.2 Feições morfológicas modeladas no MDE

A acurácia decimétrica dos MDE integrados, aliado à adequada distribuição espacial dos dados coletados, permitiu a modelagem das principais feições morfológicas indicadoras do estágio de praia em toda a sua porção. A Fig.7 ilustra exemplos de feições morfológicas visualizadas nos modelos, características dos setores emerso, submerso e alternados (emersos e submersos). No setor emerso, destacam-se as dunas frontais (*foredune*), típicas de praias dissipativas e intermediárias (MUEHE, 1996), onde as elevações estão representadas em tons de marrom a cinza claro; e, bermas (*berms*) distribuídas ao longo deste trecho, representadas em tons de verde escuro. No setor submerso se observa bancos e calhas longitudinais (*longshore bar and trough*) comuns de praias em estágio intermediário. No setor alternado foram modeladas feições que se alternam em setores praias emersas e submersas, tais como cúspides (*rhythmic bar and beach*) e terraços de baixamar (*low tide terrace*). Nos exemplos ilustrados, pode-se inferir sobre a relação entre os relevos dos trechos, independente da posição espacial, pois estão georreferenciados e relacionados a um mesmo referencial altimétrico. Assim, por exemplo, se pode identificar que as dunas frontais possuem altitudes mais elevadas do que as altitudes das bermas, assim como as cúspides e os terraços de baixamar estão em níveis mais elevados em relação aos bancos e calhas.

## 4.3 Aplicações do MDE integrado para a face praial

### 4.3.1 Estudo de perfis de praia:

#### Classificação e análise de perfil de equilíbrio

A Fig.8 ilustra exemplos de perfis de praia extraídos do MDE integrado da topografia com a batimetria. Em comparação ao método tradicional, a metodologia proposta permite a extração e classificação de perfis de praia em toda a área de abrangência da modelagem, e não apenas em perfis de praia específicos. Em relação à definição de estágios morfodinâmicos da praia é possível observar diferenças marcantes entre os exemplos de perfis de praia no estudo de caso, ilustrados na Fig.8. Klein (1997), por meio de uma equação (8), utiliza informações

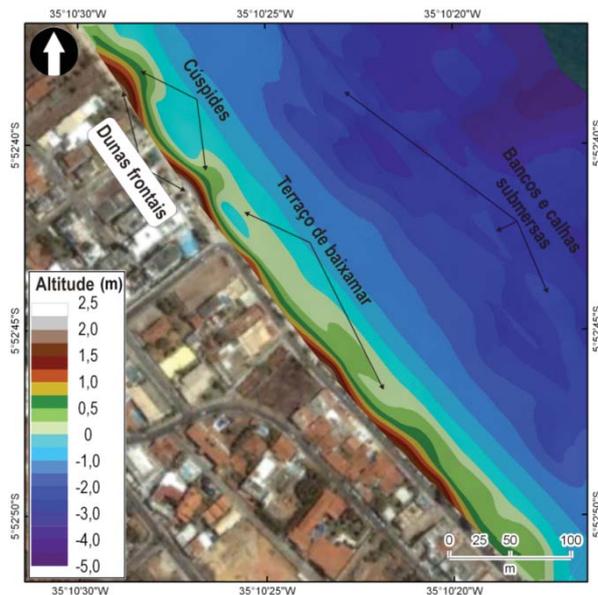


Fig.7 - Feições morfológicas modeladas na área de estudo com base na metodologia proposta. Equidistância das curvas de nível de 0,25 e 0,5 metros na porção emersa e submersa, respectivamente. Unidade: metro.

da declividade da face da praia para definir os valores teóricos de estágios de praia utilizando os valores médios de ômega ( $\Omega$ ) fixados por Wright *et al.* (1985):

$$\Omega = 0,0225/\text{Tan}\beta \quad (8)$$

A vantagem desse método é oferecer uma rápida avaliação empírica do estágio de uma praia apenas com base no MDE gerado a partir dos dados integrados topobatimétricos. Desse modo, a partir do emprego desse índice o perfil A-A' sugere um estágio morfológico de praia do tipo dissipativo ( $\Omega = 6,7$ ) que de acordo com Muehe (2001) é caracterizado por baixo gradiente topográfico e extensa zona de surfe; o perfil B-B' aponta para uma praia de estágio intermediário ( $\Omega = 4,8$ ) do tipo Banco de Calha Longitudinal (BCL) onde feições morfológicas características desse tipo de ambiente, tais como calhas e bancos, são observadas; o perfil C-C' indica estado praial também intermediário ( $\Omega = 3,3$ ) de Bancos de Praia de Cúspides (BPC). Segundo Muehe (2001), tais estágios intermediários são desenvolvidos a partir de um perfil dissipativo numa sequência acrecional com uma face de praia mais íngreme que no perfil dissipativo. Assim, foi possível inferir que o

sentido da direção de evolução da praia, bem como a intensidade de inclinação da superfície altimétrica, é de S para N.

A partir do MDE integrado pode-se analisar o suprimento de sedimentos da zona de praia em relação ao perfil de equilíbrio teórico. Para isso, devem-se ter informações adicionais dos parâmetros meteocenográficos como ondas, correntes, marés, ventos e granulometria dos sedimentos na face praial. Através do cálculo do perfil de equilíbrio (Equação 9) proposto por Dean (1977;1991), utilizando valores médios de granulometria (AMARO *et al.*, 2012b), foi encontrado o perfil de equilíbrio para cada perfil

indicado na Fig.8.

$$d = A_p x^{2.3} \quad (9)$$

Onde,  $A_p$  é o parâmetro escalar, e  $x$  é a profundidade da água desde a linha de praia, sendo que o parâmetro escalar  $A_p$  é dado em função da granulometria do perfil expresso por (MOORE, 1982; DEAN, 1983):

$$A_p = (1,04 + 0,086 \ln D)^2 \quad (10)$$

Para , onde  $D$  é o diâmetro mediano do grão.

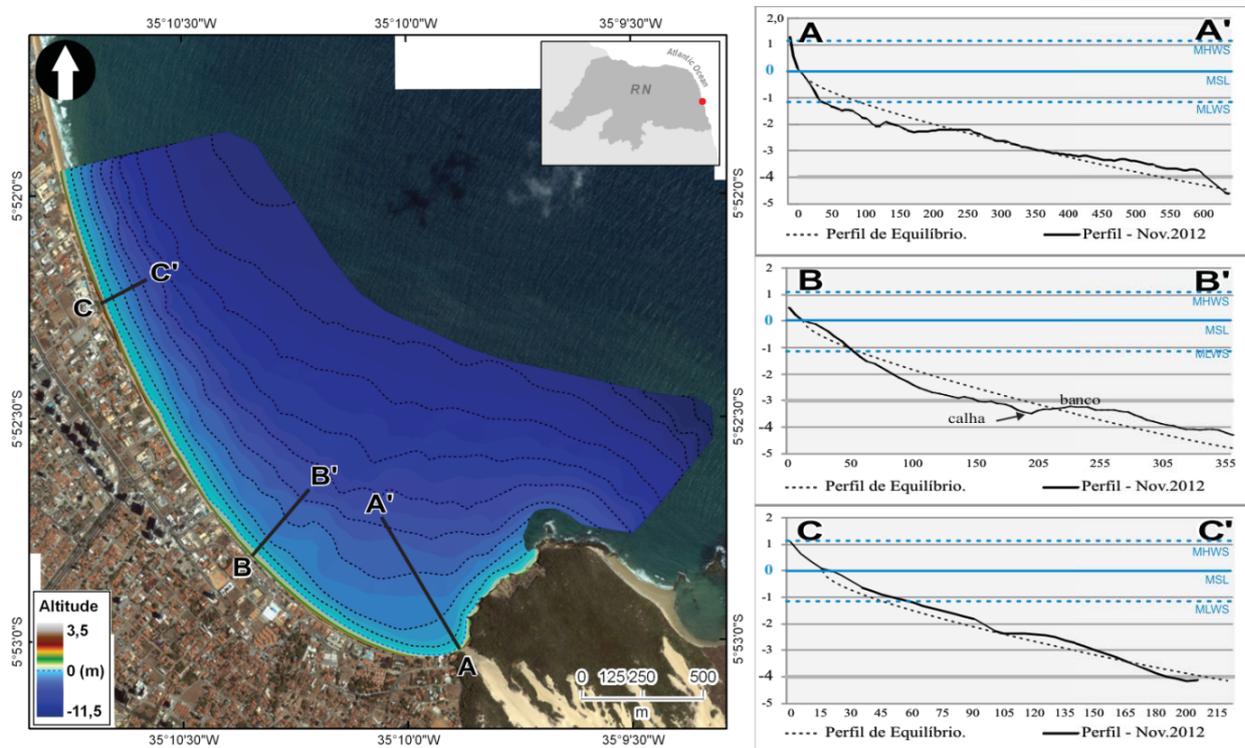


Fig.8 - Exemplos de perfis topobatimétricos extraídos do modelo de integração (linha contínua) e perfil de equilíbrio (linha tracejada). Onde MHWS - Mean High Water Spring - Média das Preamares de Sizígia; MLWS - Mean Low Water Spring - Média das Baixamares de Sizígia e MSL - Mean Sea Level – Nível Médio do Mar.

Como exemplo, o perfil A-A' da Fig.8 aponta para uma alternância entre déficit e suprimento de areia em relação ao perfil de equilíbrio teórico, tendo em vista que o atual perfil submerso da praia encontra-se nitidamente mais rebaixado na base da face da praia e mais elevado imediatamente abaixo da cota de 3 m.

O perfil B-B', por sua vez, aponta para um suprimento de sedimento adjacente à base da face praial e abaixo de 3,5 m; e falta de suprimento entre 1,0 - 3,5 m de profundidade. No perfil

C-C' é possível detectar que há um suprimento positivo de sedimento e sutil estado de equilíbrio em quase todo o perfil com ao longo do mesmo até próximo à profundidade de fechamento.

#### 4.3.2 Geração de mapas de declividade, aspecto e rede de fluxo

A Fig.9 apresenta os mapas de declividade (a), aspecto (b) e rede de fluxo (c), gerados a partir do MDE integrado. O mapa de declividade, importante no estudo da morfodinâmica praial,

mostra intervalos de declividade (em graus) para toda a área de estudo. O mapa de aspecto indica a orientação das declividades das superfícies em graus a partir do Norte (DE SMITH *et al.*, 2009). O mapa de rede de fluxo (STRAHLER, 1952, 1957; GLEYZER *et al.*, 2004) sugere os direção e sentido dos principais canais submersos encontrados na área de estudo. Em conjunto, esses mapas são úteis a diversas aplicações costeiras como, por exemplo, na indicação do sentido e da intensidade de transporte de sedimentos e da atuação de agentes dinâmicos costeiros, tais como ventos, ondas e correntes sobre a superfície praias. É notável que o comportamento dos perfis descritos na área de estudo (Fig.8) acompanha o mesmo comportamento do mapa de declividade da Fig.9 (BURROUGH & MCDONELL, 1998) indicando, como descrito na seção anterior, que a intensidade de inclinação da superfície altimétrica cresce de S para N. O mapa do aspecto da Fig.9 aponta para três direções preferenciais: NNO próximo ao perfil A-A'; NNE ao longo do perfil B-B'; NE ao largo do perfil C-C'. Tal configuração pode estar associada ao tipo de morfologia característica dessa região de baías em forma de *zeta*, onde os efeitos da estruturação neotectônica, de altos e baixos estruturais bem pronunciados, podem favorecer a erosão em decorrência do padrão de refração e difração de ondas afetadas nos relevos presentes ao longo da costa e zona submersa. Os canais tiveram orientação média para NE ( $\sim 31^\circ$ ), sendo que nas áreas mais profundas essa orientação ficou em torno de  $12^\circ$ , enquanto que próximo à porção mais rasa a orientação preferencial foi de cerca de  $43^\circ$ , com desvio padrão de  $13,5^\circ$  em toda a área. É importante ressaltar, que os modelos revelaram que os canais mapeados refletem o mesmo sentido das principais feições estruturais da região costeira.

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia desenvolvida para levantamento, geração e avaliação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de superfícies praias unificados para os setores emersos e submersos em litorais arenosos, a partir da integração de dados topográficos e batimétricos mensurados *in situ* e georreferenciados com precisão decimétrica, ajustada aos estudos de morfodinâmica costeira

em processos de curta duração. Os estudos foram realizados na enseada da Praia de Ponta Negra em Natal/RN que no decorrer das últimas décadas tem sofrido intensa erosão.

Os resultados mostraram que as coordenadas geodésicas e as altitudes ortométricas dos pontos amostrais topográficos e batimétricos foram obtidas com alta produtividade (60 pontos/minuto na topografia e 12 pontos/minuto na batimetria) e obtiveram precisão de poucos centímetros em relação à rede geodésica implantada na área de estudo, que é vinculada ao SGB: os pontos topográficos tiveram precisões com média de 0,013 m e desvio padrão de 0,006 m em N, média de 0,024 m e desvio padrão de 0,002 m em E, e média de 0,022 m e desvio padrão de 0,002 m em h; os pontos batimétricos tiveram precisões com média de 0,020 m e desvio padrão de 0,030 m em N, média de 0,044 m e desvio padrão de 0,070 m em E, e média de 0,047 m e desvio padrão de 0,080 m em h. As altitudes ortométricas dos pontos amostrais, calculadas a partir de duas estações de referência e com o modelo geoidal MAPGEO2010, tiveram desvio padrão de 0,048 m. A alta precisão absoluta em relação a um referencial geodésico unívoco, fixo e relativamente estável no tempo implica em alta precisão relativa entre as coordenadas e altitudes ortométricas dos pontos topográficos e batimétricos obtidos para a área de estudo, mesmo coletados em momentos próximos, mas distintos.

No controle de qualidade do MDE topográfico, que avalia a acurácia da modelagem realizada, as discrepâncias entre as altitudes ortométricas do modelo e as de referência, em 10 pontos de controle externos ao modelo, tiveram média de -0,010 m, desvio padrão de 0,029 m e EQM 0,047 m. Esse fato mostra a sensibilidade do MDE em representar feições morfológicas praias com dimensões decimétricas. No controle de qualidade do MDE batimétrico, que avalia as diferenças entre o MDE topográfico e o MDE batimétrico, as discrepâncias entre as altitudes ortométricas da batimetria e da topografia, em 50 pontos de controle localizados em zonas de sobreposição dos levantamentos, tiveram média de -0,073 m e desvio padrão de 0,087 m. Portanto, as altitudes ortométricas dos pontos amostrais batimétricos tiveram discrepância decimétrica em relação aos pontos amostrais

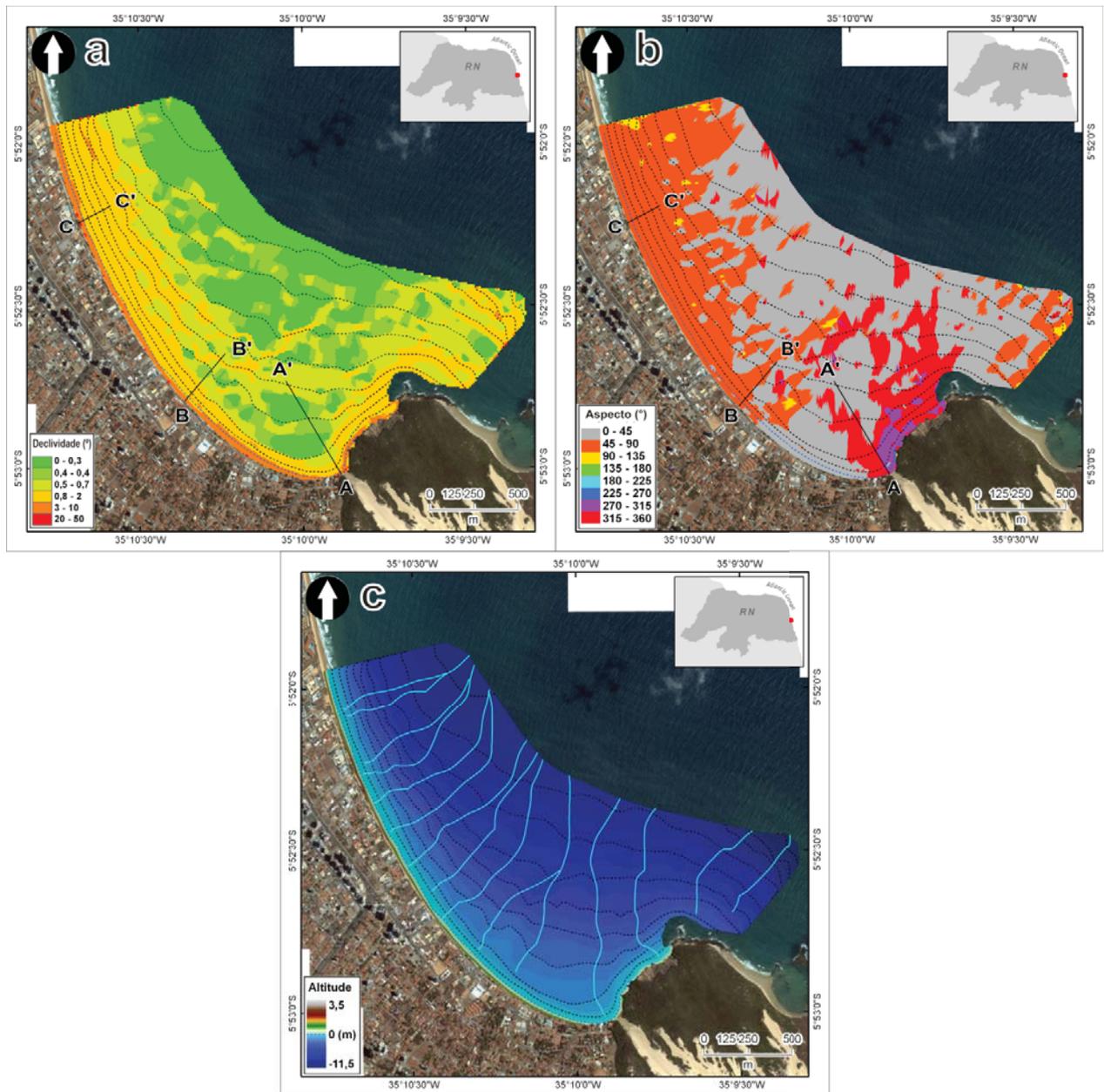


Fig.9 - Mapas de declividade (a), de aspecto (b) e de rede de fluxo (c) na porção submersa da Praia de Ponta Negra, Natal/RN.

topográficos, o que indica que a integração dos levantamentos foi realizada com acurácia adequada à composição dos perfis altimétricos da zona de praia, útil para aplicações em monitoramento costeiro e outras diversas aplicações. A acurácia decimétrica dos MDE integrados, aliado à boa distribuição espacial dos dados coletados, permitiu a modelagem das principais feições morfológicas indicadoras dos estágios de setores praias, revelando dunas frontais, bermas, cúspides, bancos, calhas e canais, como também as frequências e o padrão de distribuição espacial das altitudes. Informações importantes puderam ser extraídas, tais como a LC, as áreas e os volumes emerso

e submerso, a declividade, o sentido do plano da superfície do terreno e o balanço sedimentar.

A metodologia proposta apresentou vantagens em relação ao método tradicional, evidentes na oferta de seleção, extração de informações e classificação de perfis de praia em toda a área de abrangência da modelagem e não apenas em perfis de praia específicos, além da geração de perfis de praia completos, no mínimo até a profundidade de fechamento, que na área de estudo foi calculado em cerca de 4 metros. Nesse caso, foram possíveis as seguintes aplicações costeiras: i) identificação de estágio morfodinâmico dos diferentes setores da praia, baseada em perfis praias, com identificação de

setores dissipativo, intermediário e refletivo; ii) geração de mapas de declividade, de aspecto e de rede de fluxo a partir do MDE integrado, relevantes em estudos de geomorfologia e dinâmica costeira; iii) análise do suprimento de sedimentos da zona de praia em relação ao perfil de equilíbrio teórico, com uso de informações adicionais como ondas, marés, ventos e granulometria dos sedimentos na face de praia.

A partir da metodologia proposta tornou-se possível a realização de levantamentos topográficos e batimétricos georreferenciados ao mesmo referencial geodésico, o que permitiu a integração dos setores emerso e submerso na composição do perfil de praia completo (até a profundidade de fechamento). O georreferenciamento dos perfis de praia permite a comparação multitemporal de levantamentos realizados sistematicamente ao longo do tempo, com a possibilidade de identificação e da mensuração da variação da LC e do cálculo do volume e da orientação do transporte de sedimentos. Nesse caso, a metodologia proposta apresenta ainda a vantagem da cobertura espacial, visto que os levantamentos clássicos somente fornecem informações pontuais sobre a dinâmica das praias, muitas vezes não sendo representativos da complexidade da dinâmica costeira e insuficientes para o cálculo de balanço sedimentar areal e volumétrico.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido através da bolsa de Doutorado junto ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica & Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG-UFRN) e ao Laboratório de Geoprocessamento da UFRN (GEOPRO) pelo suporte ao desenvolvimento deste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, R.F. **Contribuição ao estudo da evolução morfodinâmica do litoral oriental sul do Rio Grande do Norte, entre Ponta de Búzios e Baía Formosa**. 1999. 252 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-

Graduação em Geociências. UFRS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 1999.

AMARO, V.E. **Análise conjunta de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto do setor extremo nordeste da província Borborema, nordeste do Brasil, com ênfase nas zonas de cisalhamento dúcteis neoproterozóicas**. 1998. 440 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Programa de Pós-Graduação de Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 1998.

AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T; SOUTO, M. V. **S. Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de precisão**. Natal: Editora Natal, 2012a. 120 p.

AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; TABOSA, W. F.; LIMA, Z. M.; SANTOS JR., O. F.; FERREIRA, A. T. S.; SANTOS, A. L. S.; BUSMAN, D. V. 2012b. **Laudo pericial item-b: Indicação das obras emergenciais de contenção e reparação dos equipamentos públicos e de segurança dos frequentadores da Praia de Ponta Negra, Natal – RN**. Natal, RN. 130 p.

AMARO, V. E.; LIMA, F. G. F DE; GOMES, L.R.S.; SCUDELARI, A.C.; NEVES, C.F. & BUSMAN, D.V. 2013a. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeast Brazil. **Proceedings of 11th International Symposium for GIS and Computer Cartography for Coastal Zones Management – Monitoring and Adapting to Change on the Coast**. Victoria, Canada, 2013. p. 10-14.

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, 2013b.

BAPTISTA, P.; BASTOS, L.; BERNARDES, C.; CUNHA, T.; DIAS, J.A. Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGPS — A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models.

- Journal of Coastal Research**, v. 24, n. 6, p. 1516-1528, 2008.
- BELLIGOTTI, F. M. & MUEHE, D. Levantamento do perfil da antepraia (shoreface) com uso de ecobatímetro portátil e caiaque. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 12, p. 257-262, 2012.
- BEZERRA, F.H.R.; DINIZ, R.; ACCIOLY, P.C.V. Falhas cenozóicas como controle geomorfológico e da sedimentação na faixa sedimentar costeira do Rio Grande do Norte. In: VII Congresso da ABEQUA, 1999, Porto Seguro-BA, **Anais**. 1999.
- BEZERRA, F.H.R.; AMARO, V.E.; VITAFINZI, C. & SAAFI, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 61-75. 2001.
- BEZERRA, F.H.; BARRETO, A. M.F.; SUGUIO, K. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. **Marine Geology**. v. 196: 1-2, 15, 2003.
- BIRKEMEIER, W. A. 1985. Field Data on Seaward Limit of Profile Change, *Journal of the Waterways, Port Coastal and Ocean Engineering*, **American Society of Civil Engineers**, v. 111, n. 3, p. 598-602.
- BOAK, E.H. & TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. **Journal of Coastal Research**, v. 1, n. 4, p. 688-703, 2005.
- BRITO NEVES, B. B.; RICCOMINI, C. FERNANDES, T. M. G.; SANT'ANNA, L. G. O sistema tafrogênico terciário do saliente oriental nordestino na Paraíba: um legado proterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 1, p. 127-134, 2004.
- BURROUGH, P. A. AND MCDONELL, R.A., **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, New York, 1998. p. 190.
- CHAVES, M.S. **Vulnerabilidade Costeira entre as Praias da Redinha e Genipabú Natal/RN**. 2000. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Departamento de Geociências Universidade Federal de Pernambuco. 2000.
- CHAVES, M. S. **Dinâmica Costeira dos Campos petrolíferos Macau/Serra, litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte**. 2005. 135 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Programa de pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, Natal, 2005.
- DEAN, R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Department of Civil Engineering, **Ocean Engineering Report**, N° 12, University of Delaware, Newark, DE. n.12, 45 p, 1977.
- DEAN, R.G., 1983. **Principles of beach nourishment**. In: Komar, P.D. (Ed.), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press, Boca Raton, 1983.
- DEAN, R. G. 1991. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. **Journal of Coastal Research**, v. 7, n. 1, p. 53-84.
- DEAN, R.G., 2002. **Beach Nourishment: Theory and Practice**. V. 18, World Scientific, Singapore. 2002. 399 p.
- DE SMITH, M.J.; GOODCHILD, M.F. AND LONGLEY, P.A. **Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools**. 3rd ed. De Montfort Mews, Leicester, UK. Winchelsea Press, 2009. Disponível em: <[www.spatialanalysisonline.com](http://www.spatialanalysisonline.com)>. Acesso: 15 abr. 2013.
- DINIZ, R.F. Erosão costeira e o desenvolvimento de costa com baías em forma de zeta no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte. In: Resumos. 50a. Reunião Anual da SBPC, 1998, Natal-RN. **Anais**. 1998. p.1041.
- DINIZ, R.F. e DOMINGUEZ, J.M.L. Erosão costeira no litoral oriental do Rio Grande do Norte. In: VII Congresso da ABEQUA, 1999, Porto Seguro-BA, **Anais**. 1999. Disponível em: [http://www.abequa.org.br/trabalhos/viiabequa\\_zcp067.pdf](http://www.abequa.org.br/trabalhos/viiabequa_zcp067.pdf). Acesso: 15 jul. 2013.
- 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.; DENTITH, M.C. & KIRBY, J.F. Strategies for the accurated determination of orthometric heights from GPS. **Survey Review**, v. 34, p. 278-295, 1998.
- 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.
- GONZALES, M.; MEDINA, R.; GONZALES-ONDINAS, J.; OSÓRIO, A.; MÉNDEZ, F.; GRÁCIA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computers & Geosciences**, 2007. v. 33, n. 7, p. 916-931.
- GLEYZER, A.; DENISYUK, M.; RIMMER, A.; SALINGAR, Y. A fast recursive GIS algorithm for computing Strahler stream order in braided and nonbraided networks, **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 4, p. 937-946, 2004.
- HALLERMEIER, R.J. Uses for a calculated limit depth of beach erosion. In: 16<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, ASCE, Hamburg. **Proceedings**. Germany, 1978. p. 1493-1512.
- HALLERMEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**, v. 4, p. 253-277, 1981.
- HIDROCONSULT. Consultoria, Estudos e Projetos. **Estudo do Comportamento hidráulico do estuário e litoral adjacente à foz do Rio Potengi, Natal - Estado do Rio Grande do Norte**. Relatório técnico. Natal: HIDROCONSULT, Relatórios Finais, 1979, v.1-2.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Informações obtidas da página do IBGE na internet**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso: 01 dez. 2012.
- IHO (International Hydrographic Organization). **Standards for hydrographic surveys**, 5th Edition, February 2008. Special Publication n°. 44. Disponível em: <http://www.iho.int/iho\_pubs/standard/S-44\_5E.pdf>. Acesso: 10 jul. 2013.
- JARDIM DE SÁ, E.; MATOS, R. M. D; MORAIS NETO, J. M. M.; SAAADI, A.; PESSOA NETO, O. C. Epirogenia cenozoica na Província Borborema: síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. VII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Bahia. **Anais**. 1999. 58-61.
- KLEIN, A.H.F. Um método indireto para a determinação do estágio morfodinâmico de praias arenosas. VI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Curitiba. **Anais**. 1997. v. 1 p. 76-78.
- KOTSAKIS, C. & SIDERIS, M.G. On the adjustment of combined GPS/levelling/geoid networks. **Journal of Geodesy**, 73: 412-421, 1999.
- LIMA, Z.M.C. **Caracterização da dinâmica ambiental da região costeira do Município de Galinhos, litoral setentrional do Rio Grande do Norte**. 2004. 191 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Programa de pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.
- MAIA, R.P.; BEZERRA, F.H.R. Neotectônica, Geomorfologia e Sistemas Fluviais: uma Análise Preliminar do Contexto Nordeste. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n.3, p. 37-46, 2011.
- MARINHA DO BRASIL - DHN (Diretoria De Hidrografia e Navegação). **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos, NORMAM-25**, Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN, 2011. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/dhn/downloads/normam/normam\_25.pdf>. Acesso: 25 jul. 2013.
- MATOS, A.C.O.C. **Implementação de digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. 2005. 335f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M.

- Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.
- MIKHAIL, E.M. & ACKERMAN, F.E. **Observations and Least Squares.** University Press of America, 1976. 497 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações.** CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A., 1996. p. 191-238.
- MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** GUERRA, A. J. T. CUNHA, S. B. (Orgs); Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A., 2001. p. 253-308, 4ª edição.
- NOAA OCS (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Office of Coast Survey*), 1976, **Hydrographic Manual**, Fourth Edition (1976). Disponível em: <[http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/docs/Hydro\\_Man\\_Ed\\_4\\_Umbach\\_1976\\_81.pdf](http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/docs/Hydro_Man_Ed_4_Umbach_1976_81.pdf)>. Acesso: 05 mai. 2013.
- NOAA OCS (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Office of Coast Survey*), 2013a, **Field Procedures Manual**, NOAA Office of Coast Survey. Disponível em: <[http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/fpm/FPM\\_2013\\_Final\\_5\\_3\\_13.pdf](http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/fpm/FPM_2013_Final_5_3_13.pdf)>. Acesso: 05 mai. 2013.
- NOAA OCS (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Office of Coast Survey*), 2013b, **NOS hydrographic specifications and deliverables**, NOAA Office of Coast Survey. Disponível em: <[http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/specs/SPECS\\_2013.pdf](http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/specs/SPECS_2013.pdf)>. Acesso: 05 maio 2013.
- OLLIKAINEN, M. Accuracy of GPS levelling. In: The XIII General meeting of the Nordic Geodetic Commission. Sweden. **Anais.** 1998. v. 1, p.25-29.
- ROCHA, C.P.; ARAÚJO, T.C.M.; MENDONÇA, F.J.B. Methodology for Location of Shorelines using 3D-GPS Positioning: A Case Study at Saaçuí Beach, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research.** Jul 2009, v.25, n.4, p.1052-1058, 2009.
- SANTOS, M.S.T. **Contribuição da Geodésia ao Monitoramento Costeiro do Litoral Setentrional do RN, área da Indústria petrolífera.** 2011. 154f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- SANTOS, M.S.T; AMARO, V.A.; FERREIRA, A.T.S; SANTOS, A.L.S. Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão no Nordeste do Brasil. **Revista de Geologia**, v. 25, HIDROSEMA-UFRN, p.7- 19, 2012.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E. 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, 2011.
- 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.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations,**

**methods and applications.** Walter de Gruyter, N. York, p.531, 1993.

SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). 2012. Disponível em: <http://www.sirgas.org>. Acesso: 01 dez. 2013.

SMC-BRASIL (SISTEMA DE MODELADO COSTERO - BRASIL) **Informações obtidas da página do SMC-BRASIL na internet.** Disponível em <http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas> Acesso: 01 agosto de 2013

SOUZA, F.E.S. **Evolução morfodinâmica da região de influencia estuarina do rio Curimataú/ RN, com ênfase nas alterações do ambiente deposicional de manguezal e a integração de geodados em SIG.** 2004. 150 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 923-938, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TANAJURA, E. L. X, KRUEGER, C. P.; GONÇALVES, R.M. Análise da acurácia dos

métodos cinemáticos de posicionamento GPS em aplicações costeiras. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.17, n.1, p.23-36, 2011.

TAVARES JUNIOR, W. **Pesquisa de modelo matemático, para simulação do espectro de energia unidimensional, de ondas de superfície geradas pelo vento (Natal, RN, 05° 45' 02" E 035° 11' 01"W).** 137f. 1980. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia do Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

VITAL, H. Rio Grande do Norte. In: MUEHE, D. (Org). **Erosão e progradação no litoral brasileiro.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, MMA, 2006. 476 p.

WRIGHT, L. D., SHORT, A. D. & GREEN, M. O. Short term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. **Marine Geology**, v. 62, p.339-3, 1985.

ZANARDI, R.P. **Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas.** 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.