

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA REPRESENTAÇÃO DE FEIÇÕES MORFOLÓGICAS DE PRAIAS ARENOSAS ATRAVÉS DE MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO

evaluation of data acquisition methodology representing morphological features of sandy beach through digital elevation model

André Luis Silva dos Santos *
Venerando Eustáquio Amaro **
Marcelo Soares Teles Santos ***

Resumo

No Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, a dinâmica costeira tem sido analisada pela comparação multitemporal de Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados por método geodésico com base no posicionamento e na altimetria GNSS em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), o que tem proporcionado mensuração de alterações morfológicas de curta duração (intranual) em escala regional. Para validar o nível de confiabilidade da metodologia geodésica, foi realizado um estudo de caso na Praia de Soledade, em Macau/RN, no qual o método geodésico foi comparado com o topográfico a partir da medição de distâncias e ângulos, considerados como referências. Na análise qualitativa, foi observado que os dois modelos apresentaram sensibilidade suficiente para representar as feições morfológicas praias presentes na área de estudo. Quantitativamente, as discrepâncias das altitudes ortométricas obtidas em relação às de referência, em nove pontos de controle externos, tiveram precisão decimétrica nos dois modelos, com média de -0,244m para o método topográfico e 0,139m para o método geodésico.

Palavras-chave: Avaliação de Metodologia; Modelos Digitais de Elevação (MDE); Monitoramento Costeiro.

Abstract

In the northeastern coast of Rio Grande do Norte (RN), the coastal dynamics has been analyzed through the multitemporal comparison of Digital Elevation Models (DEMs) generated by geodesic method based on the position and on the GNSS altimetry in relation to the Brazilian Geodesic System. That analysis has made it possible to measure the short-term morphological changes (intranual) in regional scale. In order to validate the reliability level of the geodesic methodology, a case study has been accomplished on Soledade beach, in Macau/RN, in which the geodesic method has been compared to the topographic one by measuring distances and angles, considered as references. During the qualitative analysis, it was observed that both models demonstrated enough sensibility to represent the beach morphological features of the studied area. Quantitatively, the differences between the orthometric altitudes in relation to the standard ones have had decimeter accuracy in both models in nine external control points, with an average of -0.244m for the topographic model and 1.139m for the geodesic pattern.

Key words: Methodology evaluation; Digital Elevation Models (DEMs); Coastal Monitoring.

Resumen

En el litoral septentrional de Rio Grande do Norte (RN) la dinámica costera ha sido analizada a partir de la comparación multitemporal de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados por método geodésico basado en el posicionamiento y en la altimetría GNSS en relación al Sistema Geodésico Brasileño (SGB). Eso tiene posibilitado la mensuración de las alteraciones morfológicas de corta duración (intranual) en escala regional. Para validar el nivel de confiabilidad de la metodología geodésica, ha sido realizado un estudio de caso en la playa de Soledade, Macau/RN, en que el método geodésico fue comparado con el topográfico a partir de la medición de distancias y ángulos, considerados como referencias. En el análisis cualitativo, se observó que los dos modelos presentaron sensibilidad para representar las características morfológicas de las playas del área de estudio. Cuantitativamente, las distinciones de las altitudes ortométricas obtenidas en relación a las de referencia, en nueve puntos de control externos, tuvieron precisión decimétrica en los dos modelos, con media de -0,244m para el método topográfico y 0,139m para el método geodésico.

Palabras-clave: Evaluación de Metodología; Modelos Digitales de Elevaciones (MDE); Monitoreo Costero.

(*) Doutorando em Ciência e Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Prof. Msc do Instituto Federal do Maranhão - Câmpus Universitário, CEP 59078-970, Natal (RN), Brasil. Tel: (+55 98) 3218-9067 – andresantos@ifma.edu.br

(**) Prof. Dr. da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Câmpus Universitário, CEP 59078-970, Natal (RN), Brasil. Tel: (+55 84) 3215-3212 – amaro@geologia.ufrn.br

(***) Prof. Dr. da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – Câmpus Universitário, CEP 44380-000, Cruz das Almas (BA), Brasil. Tel: (+55 84) 3215-3212- mstsantos@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A morfologia das zonas costeiras é resultado da interação entre processos oceanográficos, continentais e atmosféricos (ondas, correntes, marés, ventos, configuração da linha de costa) somados às atividades antropogênicas que, conjuntamente, transformam os ambientes costeiros e que naturalmente dificultam os métodos de levantamento para monitoramento destas regiões. Associados a isto temos extensas áreas a serem levantadas e processos eólicos e hidrodinâmicos que contribuem para a contínua modificação morfodinâmica.

Quantificar a alteração espacial da morfologia destes ambientes em curto espaço de tempo é importante nos estudos de geomorfologia e dinâmica costeira. Alguns trabalhos de monitoramento costeiro utilizam métodos tradicionais de levantamento de perfis transversais da praia com uso de níveis, teodolitos ou estação total que permitem uma representação pontual da morfologia e dependem do número de perfis para uma boa representação do ambiente costeiro, outros trabalham com técnicas de posicionamento GNSS em veículos adaptados para detalhamento da topografia praial e tem sido amplamente utilizadas para monitoramento da mudança de linha de costa e para geração de modelos digitais de elevação.

Dentre os trabalhos que tratam da quantificação do volume arenoso utilizando diferentes metodologias e aparelhos temos Morton et al. (1993) que utilizou o GNSS no método de posicionamento cinemático adaptado em um veículo traçado comparando-os com dados de levantamento tradicional com teodolito na praia arenosa de Galvestone no Golfo do México; Huang; Jackson; Cooper (2002) comparou resultados de dados obtidos por GNSS no método de posicionamento RTK e por perfis obtidos por estação total com uma precisão planimétrica de 0,010m e altimétrica de 0,019m em na praia de Runkerry no nordeste da Irlanda; Baptista et al. (2008) realizou o monitoramento de diversas praias no litoral de Portugal com GNSS em um sistema multiantena adaptado em um quadriciclo e em um monociclo obtendo precisão de 0,03m planimétricos e 0,04m altimétricos gerando MDE.

Modelos Digitais de Elevação (MDE) de praias arenosas são informações importantes nos estudos de dinâmica costeira em distintas aplicações. A comparação multitemporal entre esses elementos permite a identificação e a mensuração das variações temporais superficiais e volumétricas ocorridas nas linhas de costa (LC) e nas superfícies de praia, o cálculo das áreas e volumes de erosão/acresção, além da orientação e do transporte de sedimentos (BAPTISTA et al., 2008; ROCHA et al., 2009; SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011, AMARO et al., 2013, SANTOS, 2014). Essas informações integradas podem ser utilizadas em questões relacionadas à evolução costeira, tais como na alimentação dos modelos de prognósticos de LC, na identificação das zonas de risco à erosão costeira, no auxílio aos estudos de uso e ocupação sustentável do solo em áreas de intensa dinâmica costeira (erosão/acresção) sobre atividades antrópicas, na análise da elevação do nível do mar e de fenômenos climáticos globais como o El Niño e a La Niña (SOUTO et al., 2004; ESTEVES et al., 2006; KLEMAS, 2011; AMARO; SANTOS; SOUTO, 2012).

Na área de estudo, localizada no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte (RN), nordeste do Brasil, o monitoramento costeiro terrestre tem sido realizado pela comparação entre MDE gerados na escala trimestral pelo método de posicionamento relativo cinemático do GNSS a partir da Rede GNSS do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte (RGLS), implantada para dar apoio básico aos levantamentos geodésicos regionais de monitoramento costeiro na área, planimétricos e altimétricos (SANTOS; AMARO, 2011; SANTOS, SOUTO, AMARO, 2011, SANTOS, 2014). Tais levantamentos têm permitido análises das causas da intensa dinâmica sedimentar intra e interanual ocorrida nesse trecho de litoral e ainda propor estratégias de uso e ocupação do solo que permita o convívio sustentável das atividades antrópicas com o meio ambiente. Por exemplo, Santos; Amaro (2013) realizaram monitoramento interanual em escala trimestral de trechos do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte (LSRN), constituídos de duas praias arenosas e duas ilhas barreiras, no qual foi possível identificar a intensa erosão costeira ocorrida durante o ano de monitoramento e identificar o padrão de sazonalidade das alterações morfológicas, com escala de detalhamento

espacial à acurácia decimétrica das modelagens. Ferreira (2013) mensurou variações intra-anuais ocorridas na praia de Ponta Negra, onde foi possível, além da mensuração da dinâmica intra-anual, propor sugestões sobre obras de contenção da intensa erosão ocorrida contemporaneamente à época dos levantamentos.

O método atualmente utilizado, baseado no posicionamento e altimetria GNSS apoiado em rede geodésica unívoca, fixa e relativamente estável no tempo, doravante chamado de método geodésico, tem permitido o monitoramento de extensas áreas costeiras em curto intervalo de tempo. Essa característica do método geodésico é uma das vantagens em relação ao método topográfico convencional, que utiliza medições de distâncias e ângulos. Em áreas de grandes dimensões, variações em elevações e obstruções, como na zona costeira da área de estudo, o método topográfico pode se tornar inviável na prática devido ao longo período de observações que seriam necessárias, pois, os levantamentos devem ser realizados em uma maré específica. No entanto, apesar dos avanços obtidos na aplicação cotidiana do método geodésico, o método topográfico convencional é ainda considerado como mais preciso. Assim, o objetivo deste trabalho é validar o nível de confiabilidade da metodologia geodésica em um estudo de caso realizado na Praia de Soledade/Macau, LSRN, onde, MDE geodésicos e topográficos foram gerados, comparados e avaliados a partir de pontos de controle externos aos modelos.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Praia de Soledade, localizada no Município de Macau/RN, próximo aos povoados de Barreiras e Diogo Lopes, zona litorânea onde se concentram as atividades industriais petrolífera, salineira, de carcinicultura e eólica. Esta área está localizada entre as coordenadas UTM (Fuso 24) Norte 9.432.825,46 m e 9.442.160,02 m e UTM Leste 769.000,00 m e 770.500,00 m (Figura 1).

O litoral setentrional do RN é caracterizado pela intensa ação de processos costeiros, tais como transporte eólico e litorâneo, erosão generalizada, alterações no balanço de sedimentos, variações na Linha de Costa (LC), abertura e fechamento de canais de marés e formação de ilhas barreiras. Tais processos são influenciados por fatores geológicos (elementos tectônicos regionais e locais) interagindo com a ação direta dos agentes dinâmicos costeiros (clima, vento, marés, ondas e correntes marinhas) e pela intensa intervenção antrópica provocada pelas atividades econômicas instaladas (NASCIMENTO, 2009). Trabalhos recentes mostraram que a Praia de Soledade tem sofrido intensa erosão ao longo dos anos e décadas (SANTOS et al., 2012a; SANTOS et al., 2012b; SANTOS;AMARO, 2013, SANTOS, 2014). Décadas atrás a Ilha de Corta Cachorro era um esporão arenoso ligada à Praia de Soledade e ao longo desta região a indústria petrolífera instalou diversos poços que foram paulatinamente fechados, por conta do avanço do mar. Um dos primeiros poços onde se colocou instalações petrolíferas foi o situado nas proximidades do canal de maré que separa os dois trechos, Corta Cachorro e Soledade.

A Praia de Soledade tem uma extensão de 190m com uma largura que varia entre 40 e 160 metros. Na parte mais central é observada a presença de cúspides praias (Figura 2a). Não existe vegetação neste trecho da praia, à exceção de um pequeno manguezal que está sendo sufocado pelos sedimentos depositados em suas raízes pela ação dos ventos (Figura 2b). O setor leste tem a menor largura de praia com a presença de intervenções antrópicas (estradas vicinais e instalações industriais) ao longo da estrada de acesso onde foram implantadas estruturas de blocos de contenção para conter o avanço do mar (Figura 2c). Na porção extremo oeste, próximo ao canal de maré, a praia é relativamente plana e se observa o transporte de sedimentos para dentro do canal (Figura 2d).

O Clima da região, segundo Nimer (1989), é caracterizado como semiárido do tipo BSW'h, de acordo com a classificação climática de Köppen, com altas temperaturas e poucas chuvas dividido em duas estações bem definidas: seca entre os meses de junho a janeiro (verão ou estiagem) e chuva de fevereiro a maio (chuvosa ou inverno), com precipitação pluviométrica média de 537,5mm, máxima



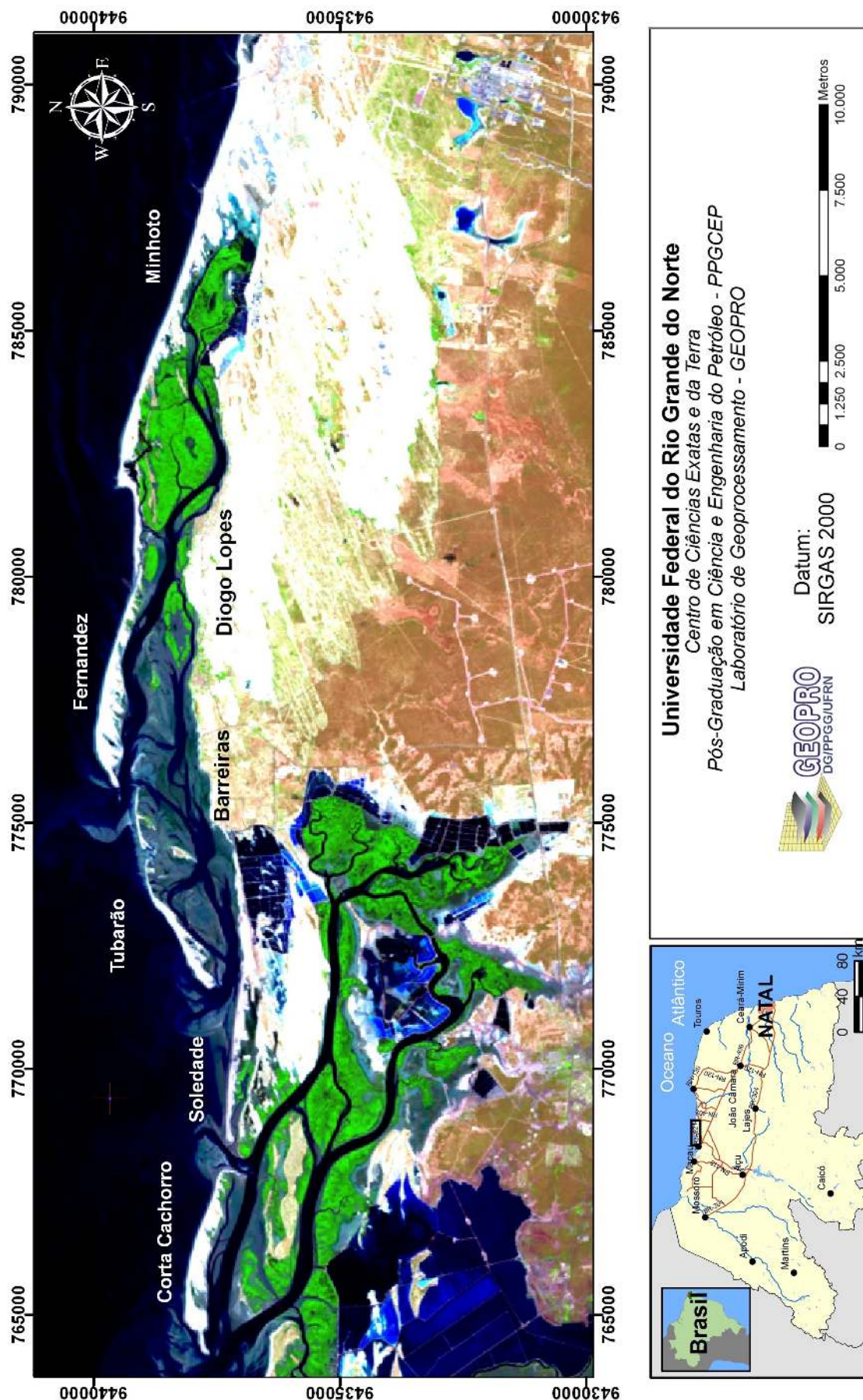


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo: Praia de Soledade, Município de Macau, Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. Imagem Landsat 8 de agosto de 2013 com as Bandas 741PAN no sistema RGBI.

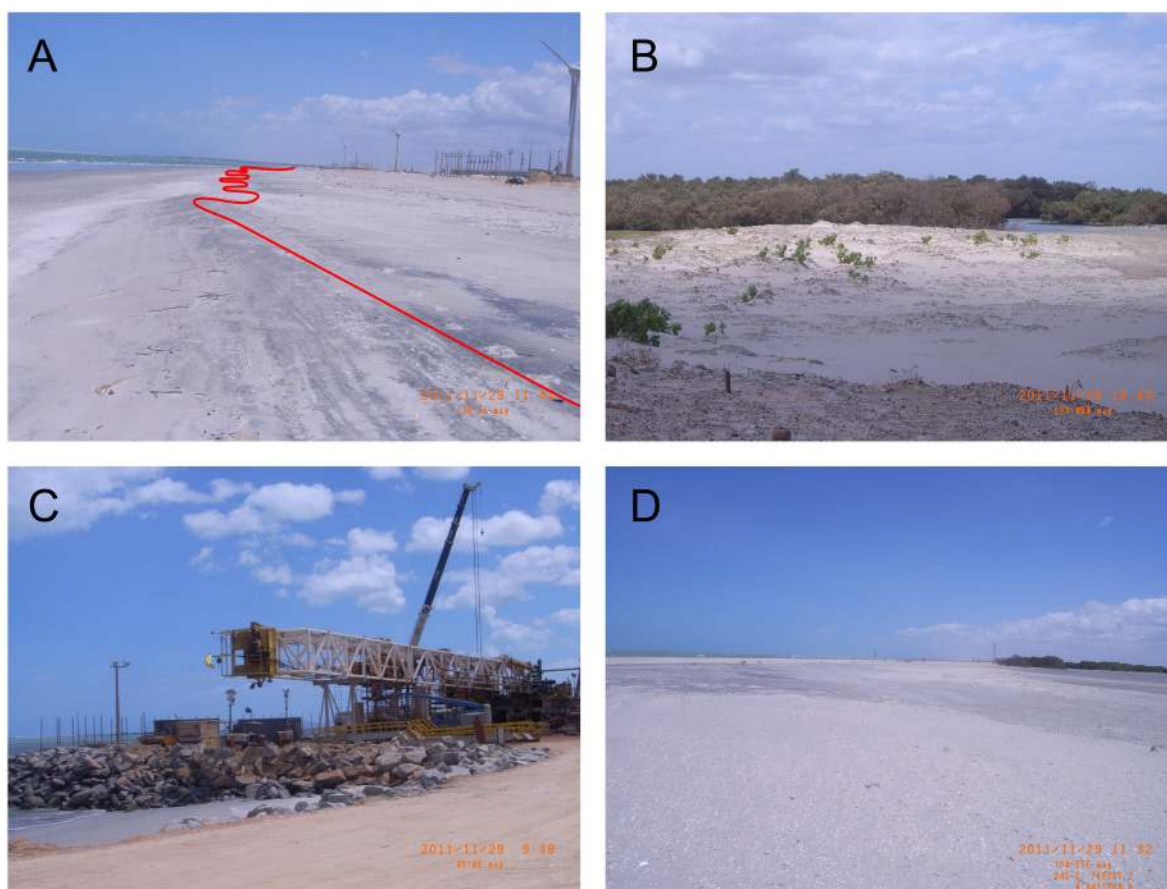


Figura 2 – Feições naturais e artificiais encontradas na Praia de Soledade: (a) cúspides praias, (b) manguezal com vegetação característica, (c) trechos com intervenção antrópica, e (d) canais de maré.

de 1780,6mm e mínima de 53,00mm. A temperatura média anual é de 27,2°C com umidade média relativa anual de 68%. (IDEMA, 1998). Predominam na região os ventos alísios influenciados pela Zona de Convergência Intertropical (ZCI), com duas direções principais: um ESE, entre os meses de março a julho, com velocidade média de 4,8 m/s; e outro ENE, entre os meses de agosto e dezembro, com velocidade média de 7,7 m/s (CALDAS, 2002; CHAVES et. al., 2006; NASCIMENTO, 2009). Os processos hidrodinâmicos atuantes são dominados por ondas de energia moderada junto à costa e acompanham as principais direções dos ventos dominantes (NE-E), com alturas de 50 a 118 cm e período entre 4 e 8 segundos (MATOS; AMARO, 2011). O regime de marés é de mesomaré semidiurna, com máxima de 2,9 m durante a maré de sizígia (preamar) e mínima de 0,43 cm durante a maré de quadratura (VITAL et al., 2008; MATOS et al., 2013). A corrente litorânea é a responsável pelo transporte de sedimentos em suspensão oriundos da ação do retrabalhamento das ondas ao longo do litoral, importantes para os processos de erosão e acreção.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram comparados e avaliados dois MDE gerados a partir de diferentes levantamentos: um topográfico convencional pela medição de distâncias e ângulos com Estação Total, e outro geodésico pelo posicionamento e altimetria GNSS, em uma área de aproximadamente 10 hectares. Os MDE gerados foram avaliados externamente por nove pontos de controle distribuídos na área de estudo. A geração de cada MDE consistiu nas seguintes etapas: Aquisição de dados, processamento de dados, geração do MDE, e controle de qualidade do MDE (Figura 3).

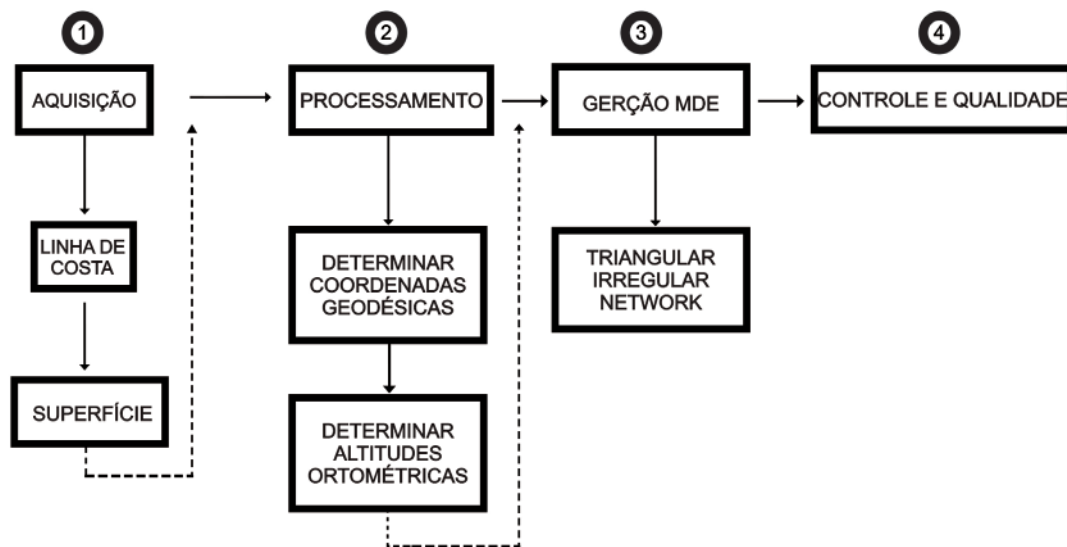


Figura 3 – Etapas da metodologia de aquisição de dados para a modelagem digital de elevação: (1) Aquisição, (2) processamento, (3) Geração do MDE e (4) Controle de qualidade do MDE

Aquisição e processamento de dados

A aquisição de dados para geração de MDE de zonas de praia, tanto pela metodologia geodésica quanto pela topográfica, ocorreu em duas etapas: a primeira consistiu no levantamento planialtimétrico da linha de costa, que é o limite externo do MDE; e a segunda consiste no levantamento planialtimétrico das superfícies de praia, que definem a área interna ao MDE. Nesse trabalho, a linha de costa foi definida como o alcance máximo da linha d'água no espriamento das ondas na face de praia na maré de quadratura em preamar. Assim, os pontos topográficos coletados coincidem com as marcas mais recentes indicadas por restos vegetais e pela diferença entre areia seca e molhada, deixadas pela última maré (SOUTO, 2004; SANTOS, AMARO, SOUTO, 2011; AMARO; SANTOS; SOUTO, 2012). A melhor identificação dessas marcas de LC ocorre logo após o pico da preamar, com a maré em vazante. Os levantamentos das superfícies de praia foram realizados logo após o levantamento das LC, com a maré em vazante, em perfis representativos das feições morfológicas normalmente encontradas nas zonas de praia, tais como perfil de praia emersa, crista do berma e berma, além de campos de dunas, com um caminhar ao logo das feições e cruzando-as, podendo ser orientados nas formas longitudinais, transversais e/ou inclinados em relação às LC.

a) Metodologia Topográfica

A Estação Total é um equipamento que combina a tecnologia de distanciômetro, equipamento medidor de distância eletrônica, e teodolito eletrônico, medidor de ângulos eletrônicos, integrados por microprocessador interno. Realiza-se a medição de distâncias e ângulos (vertical e horizontal) por meio de um feixe de laser emitido e refletido por um conjunto de espelhos refletor, denominado prisma. Para realizar a medição com o aparelho é necessário: posicioná-lo num local livre de obstáculos e que garanta a estabilidade do instrumento; realizar o nivelamento para alinhar seu eixo vertical com a direção da gravidade local; mirar o prisma colocado sobre o ponto de interesse representativo da feição a ser modelada; e realizar a medição pelas operações no teclado do aparelho. A estação emite um feixe de laser que reflete no prisma e retorna ao equipamento. O computador interno da estação então calcula os ângulos e distâncias a partir do tempo de resposta e do ângulo de rotação da luneta e armazena os pontos em sua memória interna.

O levantamento topográfico foi realizado pelo método da interseção direta, ou seja, estacionou-se o aparelho em pontos de coordenadas tridimensionais conhecidas e se observou pontos dos quais se queria determinar as coordenadas através do prisma. O cálculo da posição tridimensional de um alvo é determinado através do seu azimute a partir da orientação de base e da distância medida a partir do ponto de medição (HUANG, JACKSON, COOPER, 2002; LEE, PARK, CHOI, 2013). Na área de estudo, a Estação Total foi instalada no ponto mais alto da praia para que não fosse necessária a mudança de estação, sendo possível visualizar toda a área estudada coletando dados com o prisma com uma altura de 1,60m. O ponto no qual a estação foi instalada, além de uma estação à RÉ, foram georreferenciados e niveladas pelo posicionamento GNSS em relação à estação da rede geodésica implantada na área de estudo (RGLS, Figura 4), as quais possuem coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas relacionadas ao SGB, no sistema SIRGAS2000 (SANTOS; AMARO, 2011). O uso do mesmo sistema geodésico utilizado no método geodésico permitiu a comparação dos modelos obtidos pelos métodos topográficos e geodésicos. A Estação Total utilizada foi do modelo Topcon GTS 3007, que apresenta precisão angular de $\pm 7''$ e linear de $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Os processamentos de dados foram realizados com o software Topograph, versão 3.89, da Chair Point Tecnologia.

b) Metodologia Geodésica

Os levantamentos geodésicos foram realizados pelo posicionamento relativo cinemático pós-processado GNSS (Postprocessed Kinematic – PPK), no qual dois receptores coletam dados simultaneamente: um instalado sobre a estação base, de coordenadas conhecidas, e outro nos pontos de interesse, chamadas de estações móveis. O receptor móvel foi adaptado em um quadriciclo motorizado, permitindo o aumento da produtividade na aquisição de dados. Os receptores utilizados foram do modelo Trimble R3 que possui precisão horizontal de $10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ e vertical é de $20 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, operando com taxa de gravação de 1 segundo. Como estação de referência ao posicionamento relativo foi utilizada estação da RGLS (Figura 4), a partir da qual foi possível utilizar bases curtas aos posicionamentos GNSS, ou seja, a determinação de coordenadas geodésicas com alta precisão em curto intervalo de tempo.

A etapa de processamento dos dados consistiu de duas etapas: determinação das coordenadas geodésicas e determinação das altitudes ortométricas. As coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) e os erros padrões dos pontos levantados em campo foram obtidos nos processamentos e ajustamentos dos dados GNSS, realizados com o programa Topcon Tools versão 7.5.1. Para garantir precisão e confiabilidade ao posicionamento, os processamentos de dados foram realizados com solução do tipo Fixa (fixação das ambiguidades como números inteiros - recomendada para vetores precisos com poucos quilômetros), nível de confiança de 68 %, e com o erro padrão admissível dos vetores de 10 cm. As altitudes ortométricas dos pontos amostrais, referenciadas à superfície de nível médio dos mares, foram calculadas a partir das altitudes geométricas, referidas à superfície do elipsóide de revolução adotado no posicionamento (MONICO, 2008). Para determinar altitudes ortométricas (H), a partir das geométricas (h) obtidas com o GNSS, é indispensável o conhecimento da ondulação geoidal (N) segundo a equação (Figura 5):

$$H = h - N \quad (\text{Equação 1})$$

As alturas geoidais foram obtidas com o modelo geoidal MAPGEO2004 (IBGE, 2011), onde foram aplicadas as correções de efeitos sistemáticos determinadas em Santos et al. (2013).



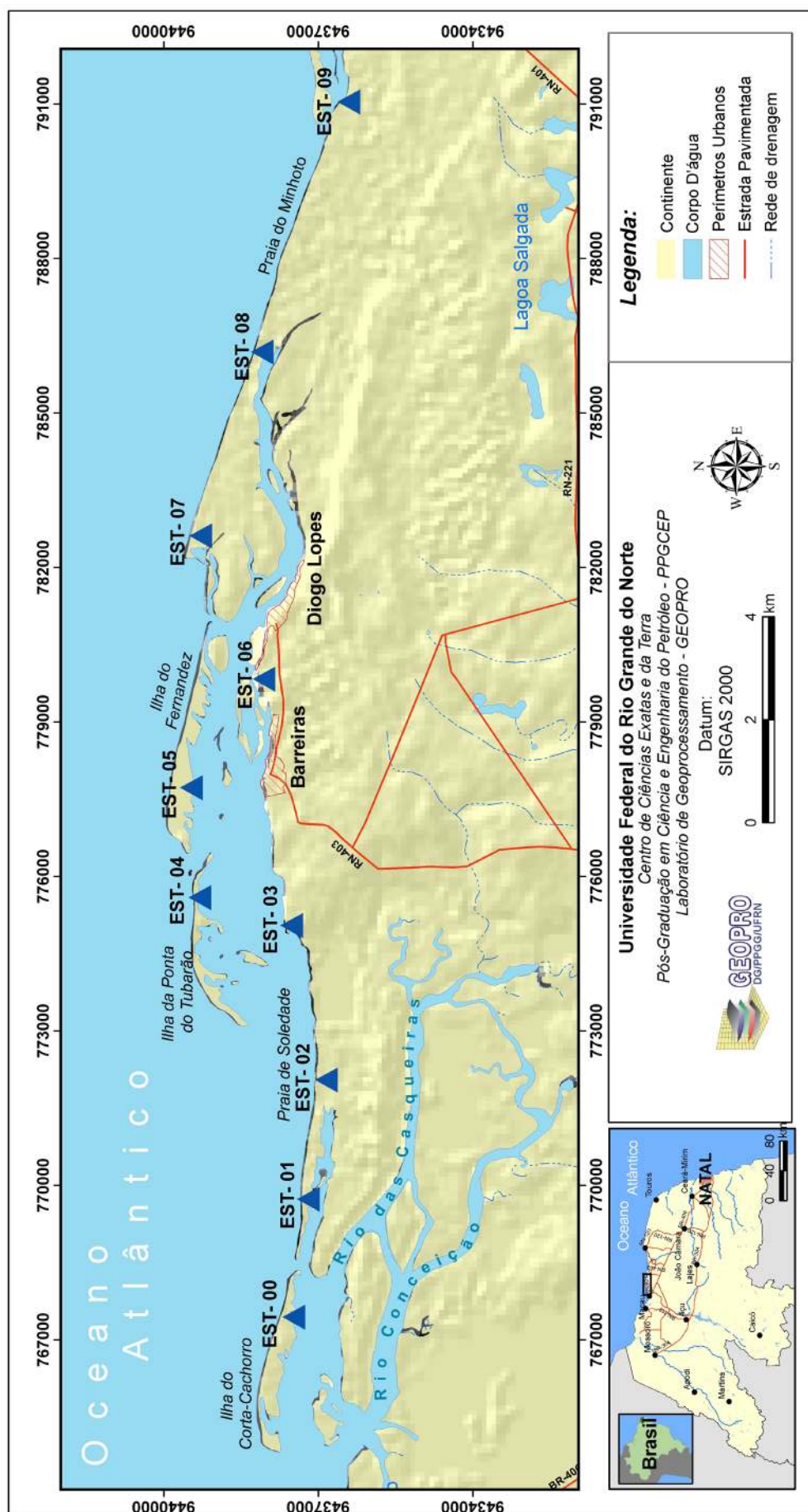


Figura 4 – Localização das estações da Rede GNSS do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte (EST-00 até EST-09).

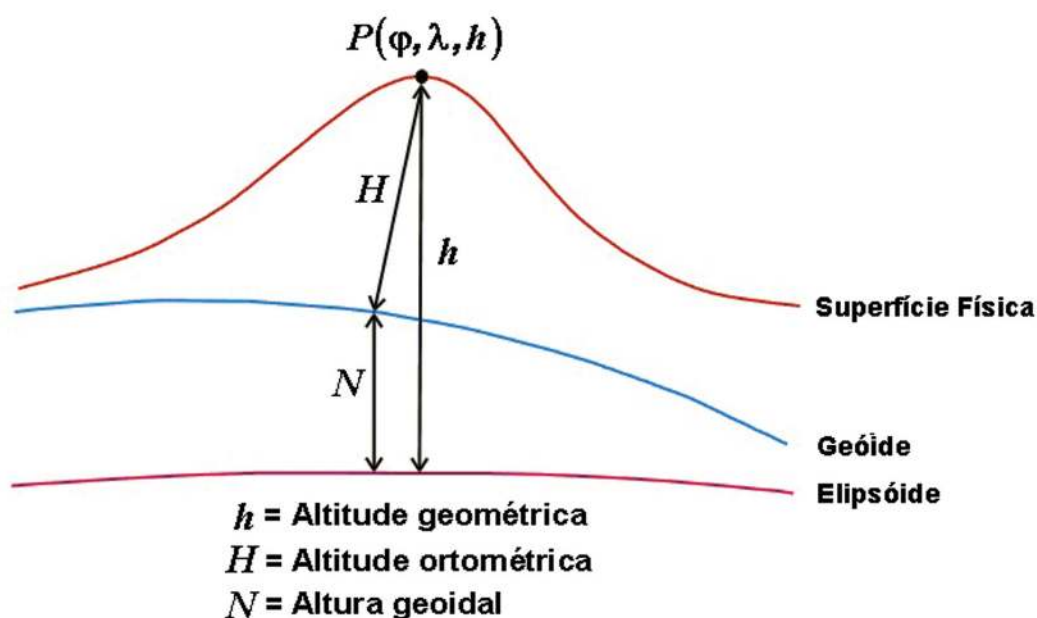


Figura 5 – Altimetria por GNSS no modo absoluto

Geração dos Modelos Digitais de Elevação

Na geração dos MDE, tanto pelo método topográfico quanto pelo geodésico, foi utilizada a interpolação por triangulação com uso da técnica TIN (Triangular Irregular Network) que consiste numa estrutura em que pontos cotados com distribuição irregular (ou regular) são conectados por uma rede de arestas formando 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; SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011). Os pontos foram conectados de acordo com a triangulação de Delaunay, a qual 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. A interpolação pelo método TIN foi utilizada, pois, de acordo com avaliações realizadas em Amaro et al. (2013), é a mais adequada para a representação de superfícies de praias arenosas, quando comparada com outros interpoladores. Para aplicar o método TIN com a triangulação de Delaunay, foi utilizado o software ArcGIS, versão 9.3, da ESRI®.

Avaliação dos Modelos Digitais de Elevação

O controle de qualidade foi realizado através da análise das discrepâncias entre as altitudes de referência, obtidas pelo posicionamento GNSS no método estático, e as altitudes obtidas nos MDE topográficos e geodésicos, nos pontos de controle distribuídos na área de estudo. As discrepâncias entre as altitudes de referência (x_i^r) e as obtidas no modelo analisado (x_i^m) são calculados pela expressão

$$\Delta x_i = x_i^r - x_i^m$$

Equação 1

em amostras com $i = 1, 2, 3, \dots, n$ pontos de controle selecionadas aleatoriamente na área de estudo. Assim, para os n pontos de controle, são calculados a média e o desvio padrão dos resíduos, respectivamente, por:



$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

Equação 2

e

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta\bar{x})^2$$

Equação 3

A partir das discrepâncias obtidas foram realizadas estatísticas que permitiram definir correlações na comparação entre os valores medidos nos levantamentos e os valores de referência. Foi realizada a análise dos índices estatísticos da média do erro percentual absoluto (MAPE - Mean Absolute Percentage Error, Equação 4), do valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE - Root mean square error, Equação 5), do coeficiente de correlação (R^2 , Equação 6), e do índice de concordância (d, Equação 7).

Os valores da média do erro percentual absoluto (MAPE, Equação 4), é um indicador de acerto de estimativa e varia entre 0% e 100%, e é dado por:

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|(O_i - P_i)|}{O_i}$$

Equação 4

Onde, O_i são os valores medidos “in loco”, P_i são os valores dos pontos de controle, e N é o número de observações.

O valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE, Equação 5), utilizado para avaliar a extensão de quanto os dados variam entre o valor real do ponto e o valor do mesmo na curva de melhor ajuste, é conhecido por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P)^2}$$

Equação 5

Através do coeficiente de correlação R^2 (Equação 6) obtém-se medida de ajustamento de um modelo estatístico indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O R^2 é calculado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right)}}$$

Equação 6

Onde, $\bar{O}$ é a média dos valores medidos e $\bar{P}$ é a média dos valores dos pontos de controle.

O índice de concordância ou reajuste (d, Equação 7) define a precisão dos valores estimados em relação aos observados, ou seja, está relacionado ao afastamento entre esses valores. O seu valor varia de 0 a 1, onde, quanto mais próximo de 1 menor a amplitude dos erros. É calculado por:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Equação 7

Para todas as equações acima temos que O_i são os valores medidos “in loco”, P_i são os valores dos pontos de controle, $\bar{O}$ é a média dos valores medidos, $\bar{P}$ é a média dos valores dos pontos de controle e n é o número de observações.

RESUL.TADOS E DISCUSSÃO

Modelos Digitais de Elevação

A Figura 6 apresenta as nuvens de pontos obtidas no levantamento geodésico realizado na Praia de Soledade (Figura 6a), em fevereiro de 2012, com detalhe para o setor Oeste da praia (Figura 6b), onde se localiza o Campo de Petróleo Serra. Nesse levantamento foram coletados 7.126 pontos amostrais com distribuição irregular, distribuídos em função das diferentes feições morfológicas encontradas na época do levantamento. As precisões obtidas nos processamentos de dados GNSS tiveram média de 1,0 cm em N, 2,4 cm em E, e 2,5 cm em h para as coordenadas UTM. A Figura 7 apresenta as nuvens de pontos geodésicas e topográficas obtidas em trecho do setor Oeste da Praia de Soledade, utilizadas na avaliação do método geodésico, bem como a localização dos nove pontos de controle para avaliação estatística. Como visualizado na Figura 7 o método geodésico tem como principal vantagem a alta produtividade na coleta de dados, havendo uma superabundância de informações sobre a morfologia costeira. No método geodésico foram levantados 789 pontos, enquanto no topográfico 58 pontos.

A Figura 8a apresenta o MDE do setor oeste da Praia de Soledade, obtido pelo método geodésico, enquanto as Figuras 8b e 8c mostram, respectivamente, os MDE obtidos no método geodésico e no topográfico, no trecho utilizado na avaliação do método geodésico. O sistema de projeção utilizado foi o plano UTM (Fuso 24) e as curvas de nível geradas tiveram equidistância vertical de 0,20 m – compatível com a acurácia dos modelos. Para melhorar a visualização dos modelos nas escalas adotadas foi aplicada uma tabela de cores com variações de 0,50 m, do azul (região mais baixa) ao vermelho (região mais alta). Visualmente, observa-se que os modelos topográficos e geodésicos conseguiram representar de maneira semelhante as feições presentes na área de estudo.

A Figura 9 ilustra exemplos de feições morfológicas modeladas nos MDE, onde foi possível a identificação das principais feições morfológicas típicas de zonas de praia, tais como perfis de praia emersa, planos horizontais e inclinados, depressões e elevações, além de feições morfológicas típicas de praia em erosão, como escarpas em bermas. A Figura 9a mostra um trecho de canal de maré e a declividade formada pelo trabalho das marés altas e baixas, com suas elevações bem definidos com a região em declividade em tons claros. A Figura 9b mostra a região que possui dunas localizadas próximas ao campo Serra com tonalidades claras. A Figura 9c apresenta planos horizontais a sul da área de estudo e próximo ao canal de maré por conta das marés altas que lavam este terraço deixando-o com elevações mais baixas e planas. A Figura 9d representa um trecho de cúspides praias, formado pela ação da maré e pela corrente de deriva, onde as elevações estão representadas em tons amarelo-alaranjado e as depressões pelos tons de cores azuis. Nos exemplos mostrados pode-se inferir a respeito da relação entre os relevos dos trechos, independente da posição espacial, pois estão georreferenciados e relacionados a um mesmo referencial altimétrico; assim, por exemplo, a região do estirâncio possui altitudes mais baixas do que as altitudes dos cúspides, e o canal de maré possui altitudes mais baixas do que as altitudes dos campos de dunas.



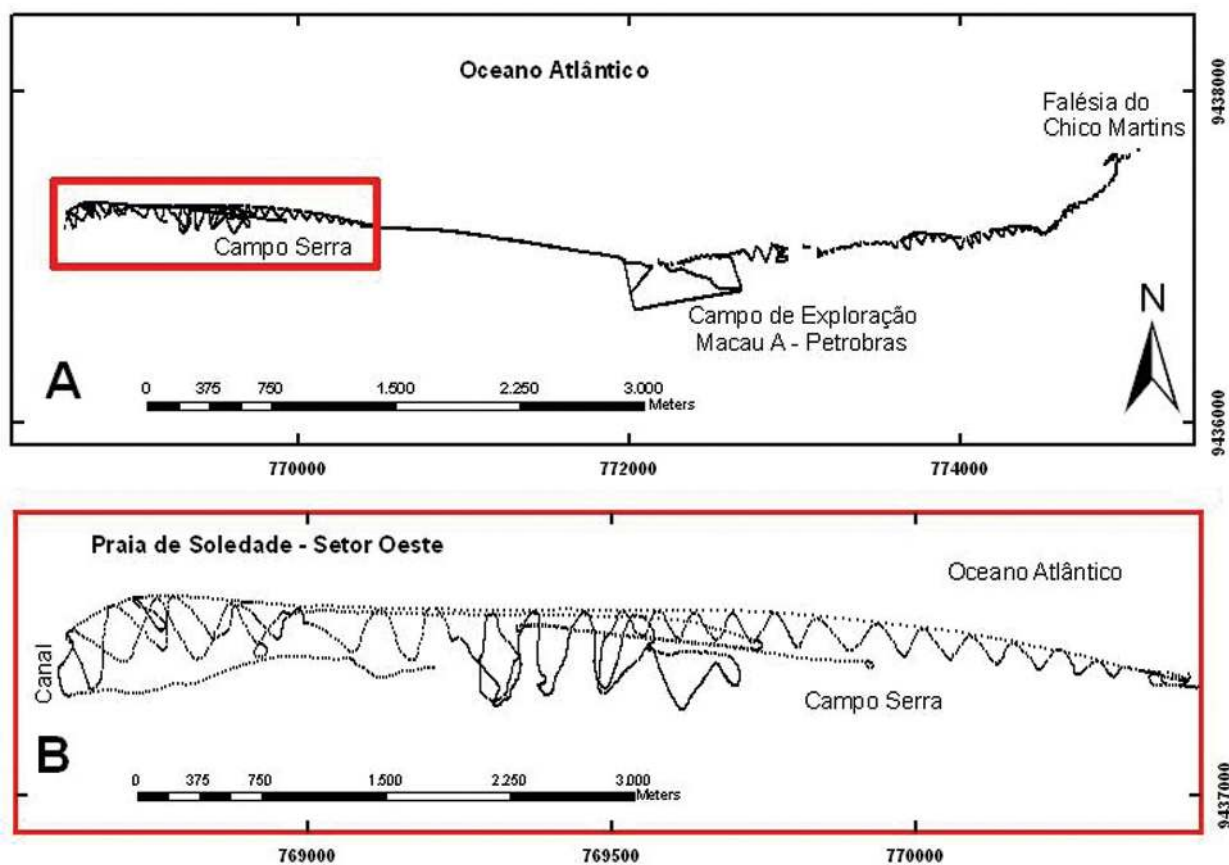


Figura 6 – Nuvens de pontos do levantamento geodésico realizado na Praia de Soledade, em fevereiro de 2012 (a), com detalhe para o setor Oeste da praia (b), onde se localiza o Campo Petrolífero Serra.

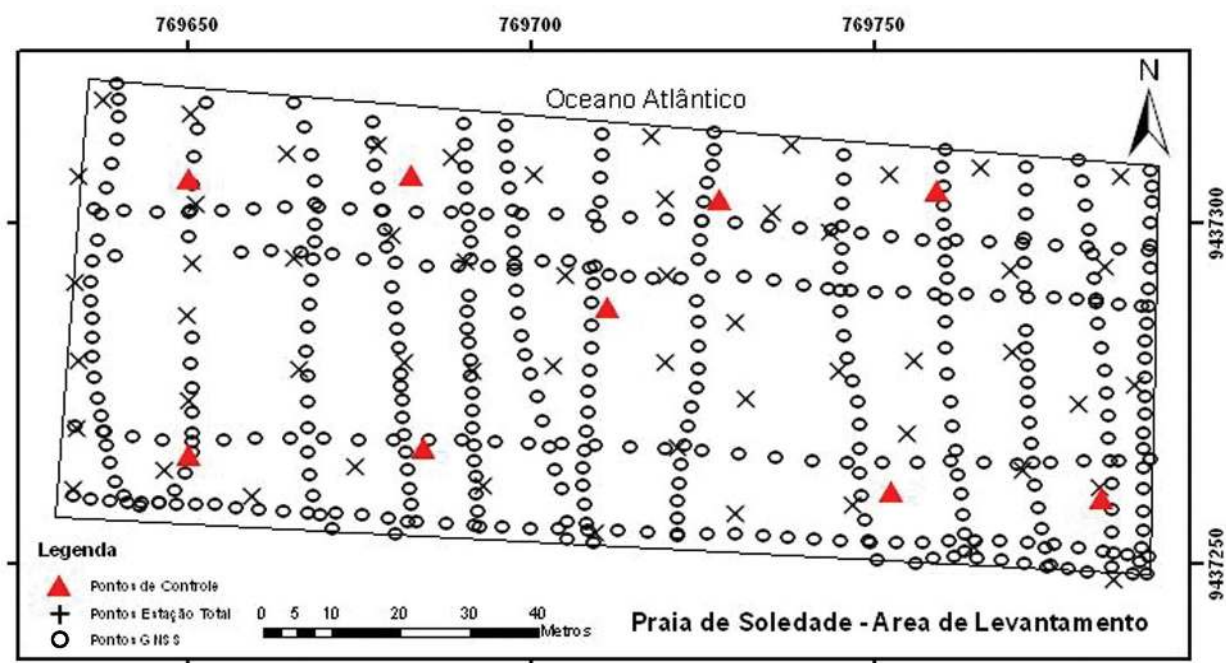


Figura 7 – Nuvens de pontos geodésicas e topográficas obtidas na área de estudo da Praia de Soledade, utilizadas na avaliação do método geodésico com os 9 pontos de controle.

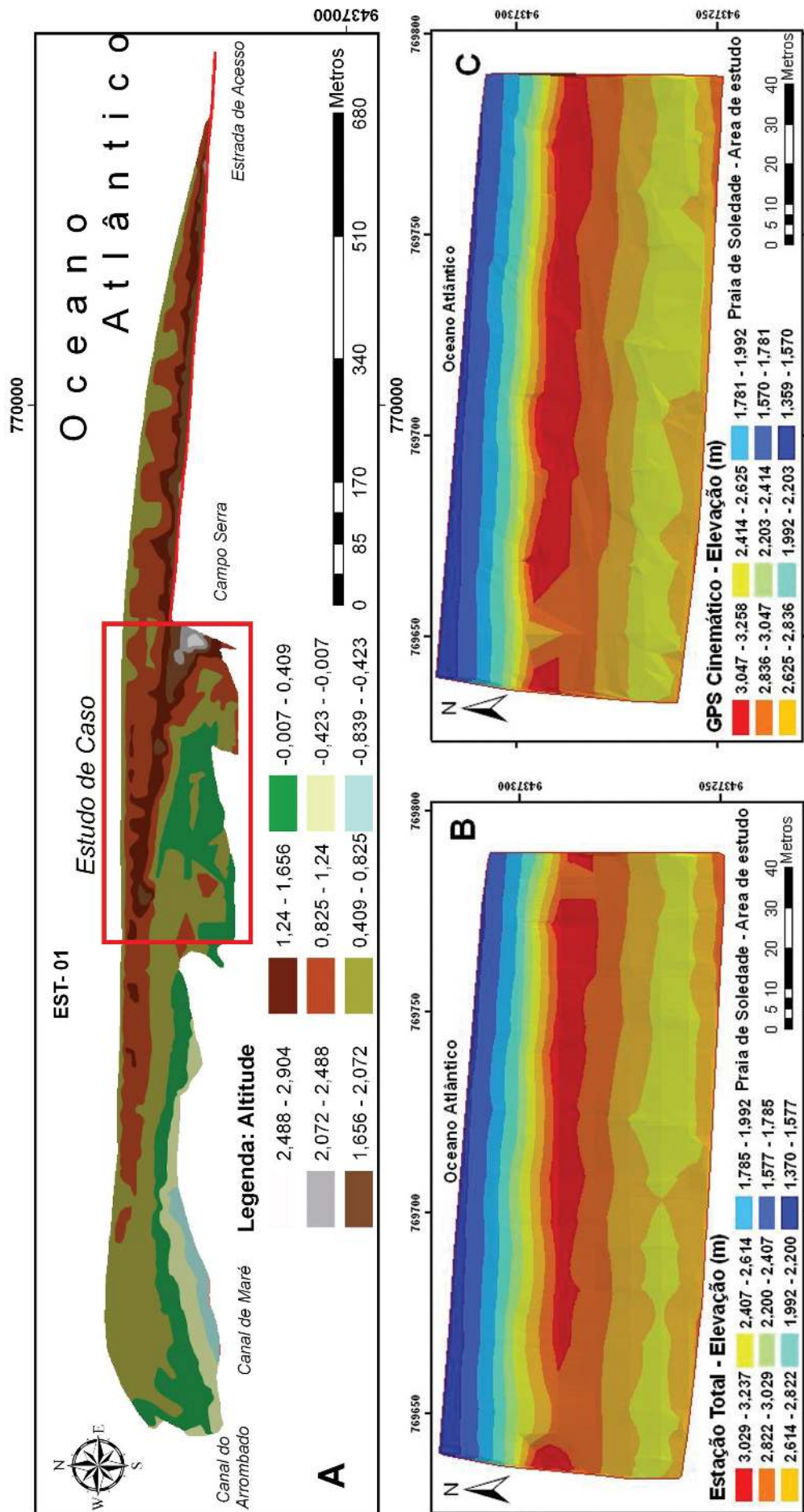


Figura 8 - Modelo Digital de Elevação do setor oeste da Praia de Soledade (a), com destaque ao MDE do trecho do estudo de caso gerado pelo método topográfico (b) e geodésico (c). Equidistância vertical das curvas de nível de 0,20 m. Unidade: metro.

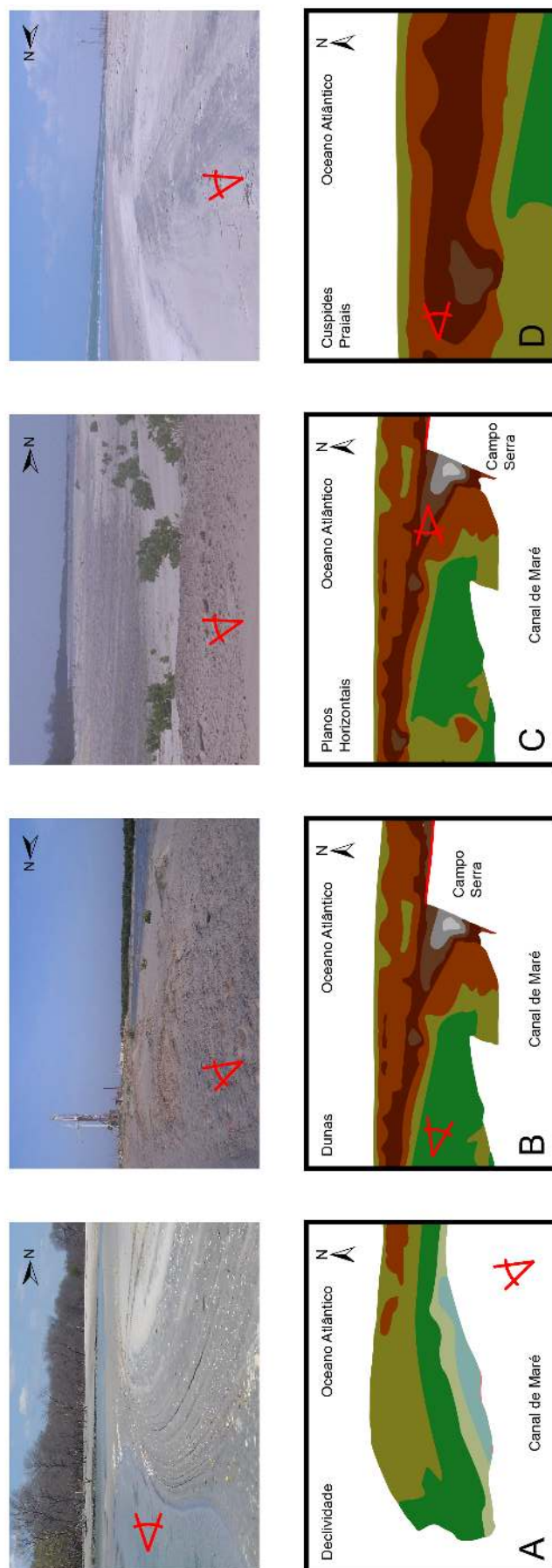


Figura 9 - Feições morfológicas modeladas na área de estudo: a) Declividade próxima ao canal de maré, b) Dunas, c) Planos horizontais, e d) Cúspides praias. Equidistância vertical das curvas de nível de 0,20 m. Unidade: metro.

Controle de qualidade dos modelos

A Tabela 1 apresenta o resultado dos processamentos GNSS dos nove pontos de controle utilizados no controle de qualidade dos MDE, com suas coordenadas e desvios padrões obtidos. Os desvios padrões tiveram média de 0,42 cm em N, 0,42 cm em E, e 1,1 cm em h, o que mostra precisão centimétrica ao posicionamento.

Tabela 1 - Coordenadas e precisões dos nove pontos de controle

<i>Nome</i>	<i>N</i>	<i>E</i>	<i>h</i>	<i>sN</i>	<i>sE</i>	<i>sh</i>
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
p1	9437249,175	769788,996	-3,354	0,004	0,004	0,011
p2	9437281,815	769789,78	-3,302	0,004	0,004	0,011
p3	9437308,852	769790,316	-4,792	0,004	0,004	0,011
p4	9437313,905	769727,244	-4,871	0,004	0,004	0,01
p5	9437285,453	769724,839	-3,238	0,004	0,004	0,01
p6	9437252,603	769721,897	-3,639	0,005	0,005	0,012
p7	9437257,489	769629,792	-3,405	0,004	0,004	0,011
p8	9437290,716	769632,385	-3,233	0,004	0,004	0,011
p9	9437321,485	769634,299	-5,033	0,005	0,005	0,012
		Média		0,0042	0,0042	0,0110
		D.Padrão		0,0004	0,0004	0,0007

N – Coordenada Norte, E - Coordenada Este, h – altura elipsoidal, sN –desvio padrão para N, sE – desvio padrão para E, sh – desvio padrão para h.

A Tabela 2 apresenta as altitudes ortométricas de referência e as obtidas pelos métodos topográfico e geodésico, além de suas discrepâncias em relação à de referência, onde contém as estatísticas básicas: média, desvio-padrão, altitudes máxima e mínima, e amplitude.

Tabela 2 – Estatísticas das discrepâncias das altitudes obtidas nos métodos topográfico e geodésico. Unidade: Metro

<i>Nome</i>	<i>H Real</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>Discrepância</i>	<i>Discrepância</i>
		<i>Topográfico</i>	<i>Geodésico</i>	<i>Topográfica</i>	<i>Geodésica</i>
P1	3,063	2,815	2,970	0,248	0,093
P2	3,116	2,870	3,028	0,246	0,088
P3	1,626	1,371	1,602	0,255	0,024
P4	1,547	1,313	1,497	0,234	0,050
P5	3,180	2,943	3,048	0,237	0,132
P6	2,779	2,557	3,268	0,222	0,489
P7	3,013	2,763	2,711	0,250	0,302
P8	3,185	2,942	3,111	0,243	0,074
P9	1,385	1,124	1,382	0,261	0,003
Média				0,244	0,139
D. Padrão				0,011	0,148
Mínimo				0,222	0,003
Máximo				0,261	0,489
Amplitude				0,039	0,486



A Tabela 3 apresenta os indicadores estatísticos das discrepâncias amostrais das altitudes dos MDE. De acordo com a Tabela 2, a média das discrepâncias obtidas no método geodésico foi de 13,9 cm enquanto no método topográfico foi de 24,4 cm, ou seja, a acurácia do método geodésico foi quase a metade do método topográfico. A discrepância mínima para o método geodésico tende a zero (0,3 cm) e, dos 9 pontos de controle amostrados, 6 deles tem discrepância inferior a 10 cm, evidenciando a boa precisão vertical para a metodologia geodésica. A partir da Tabela 3 pode-se inferir que ambos os modelos apresentam ótima correlação com a altitude real, conforme é mostrado pelos indicadores estatísticos MAPE, RMSE, R^2 e d. Ao comparar o desempenho dos modelos com o MAPE têm-se valores baixos para ambos os índices, com 0,1234 para o topográfico e 0,048 para o geodésico, destacando o método geodésico com o mais correlacionado. Na análise do RMSE os valores também são baixos e semelhantes com 0,2443 para o topográfico e 0,2035 para o geodésico.

Tabela 3 – Indicadores estatísticos das discrepâncias amostrais das altitudes dos MDE

<i>Nome</i>	<i>Discrepância Topográfica</i>	<i>Discrepância Geodésica</i>
MAPE	0,1234	0,0488
RMSE	0,2443	0,2035
R^2	0,9998	0,9266
D	0,9733	0,9805

A Figura 10 apresenta o diagrama de dispersão entre as altitudes dos MDE e as de referência, além da curva de tendência ajustada aos dados. As Figura 10a e 10b evidenciam que as altitudes coletadas com o método topográfico “in loco” possuem uma alta correlação com as altitudes de referência, como também, seu coeficiente de determinação (R^2) explica cerca de 99,9% da variação das amostras. As Figura 10c e 10d mostram que as altitudes coletadas com o método geodésico “in loco” possuem alta correlação com as altitudes de referência, como também, seu coeficiente de determinação (R^2) explica cerca de 92,6% da variação das amostras.

Na Tabela 3 e na Figura 10 é observado que o coeficiente de determinação R^2 para o método topográfico é maior do que o mesmo coeficiente para o método geodésico. No entanto, ao analisar o índice de concordância d (Tabela 3), observa-se uma inversão de correlação com um valor de concordância maior para o método geodésico, ou seja, 98,0 % de correlação. Conclui-se que, de modo geral, ambos os modelos conseguem representar bem as feições morfológicas praiais presentes na área de estudo. Quantitativamente, as discrepâncias altimétricas obtidas nos pontos de controle tiveram precisão decimétricas nos dois modelos.

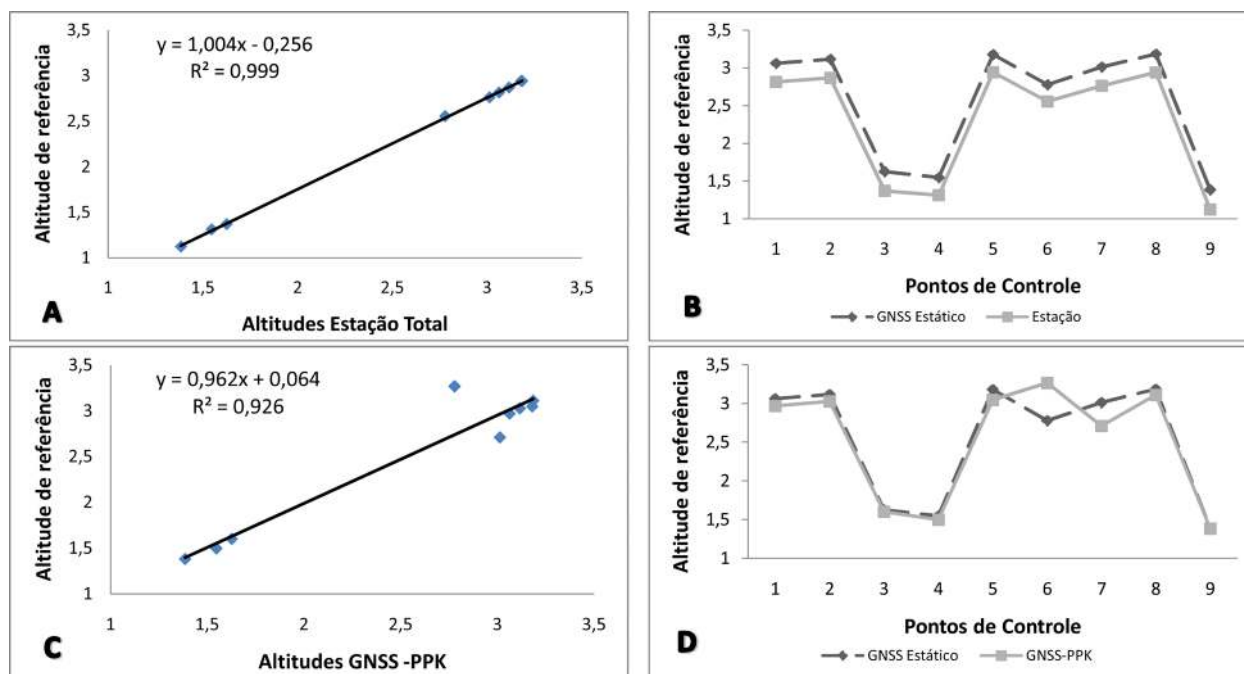


Figura 10 – Diagrama de dispersão e equação de ajuste entre os valores das altitudes de referência e as altitudes do modelo (a) e (c). Gráfico de Correlação entre os valores das altitudes de referência e as altitudes do modelo (b) e (d).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a validação de metodologia geodésica utilizada na modelagem digital de elevação de praias arenosas a partir de dados obtidos na praia de Soledade, localizada no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, área de alta sensibilidade ambiental e caracterizado pela presença de atividades antrópicas, dentre as quais se destaca a indústria petrolífera que possui poços instalados ao longo desta praia. Para isso, um MDE geodésico (obtido pelo posicionamento e altimetria GNSS) foi comparado com um MDE topográfico (obtido por medições de distâncias e ângulos) e ambos foram avaliados com uso de pontos de controle externos aos modelos.

No controle de qualidade dos MDE, avaliado pelas discrepâncias entre as altitudes ortométricas dos modelos e as de referência, em nove pontos de controle, resultou nas seguintes estatísticas: média de -0,244 m e desvio padrão de 0,011 m no método topográfico, e média de 0,139 m e desvio padrão de 0,148 m no método geodésico, ou seja, a acurácia obtida no MDE geodésico foi quase duas vezes melhor do que no MDE topográfico. Na análise qualitativa foi possível identificar, nos dois modelos, as formas morfológicas e os padrões de distribuição espacial do relevo em cada trecho modelado. Foram modeladas as principais feições morfológicas típicas de zonas de praia, tais como perfis de praia emersa, bermas e cristas de bermas, planos horizontais e inclinados, depressões e elevações. Assim, os resultados mostraram que a metodologia geodésica pode ser utilizada com eficiência na modelagem e representação das feições morfológicas típicas de zonas de praia.

O método topográfico convencional é tradicionalmente considerado o de maior acurácia em trabalhos de planialtimetria. No entanto, em áreas de grandes dimensões, variações em elevações e muitas obstruções, como nas aplicações da área de estudo, o levantamento pode se tornar inviável devido ao longo período de observações que seriam necessárias, pois, os levantamentos devem ser realizados em maré específica. Dessa forma, a conclusão de que o método geodésico é compatível em acurácia ao método topográfico é de fundamental importância à continuidade dos levantamentos realizados no RN, pois, valida as potencialidades do método que já vem sendo aplicado. As potencialidades de acurácia, eficiência e produtividade do método geodésico tem permitido o monitoramento de extensas áreas costeiras em curto intervalo de tempo. Além disso, o uso de referenciais unívocos, fixos e relativamente estáveis no tempo permite que os levantamentos sejam realizados sempre nos mesmos referenciais, sendo adequados para o monitoramento multitemporal de precisão.



AGRADECIMENTOS

Pesquisa financiada com recursos dos projetos de pesquisa MOLECO e CRONALOG da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste de Monitoramento Ambiental de Áreas sob a Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05 – PETROMAR, CTPETRO – FINEP/PETROBRAS/CNPq). Atividades desenvolvidas com o apoio logístico do Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) do Departamento de Geologia da UFRN, do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN), do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP/UFRN) e do IFMA, responsável pela concessão de Bolsa de Doutorado (PROQUALIS).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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*, vol. 76. 2013.

AMARO, V.E.; SANTOS, M.S. T.; SOUTO, M.V.S. **Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. 1ª Ed. Natal, Edição dos Autores, 118p. 2012.

BAPTISTA, P.; BASTOS, L.; CUNHA, T.; BERNARDES, C.; DIAS, J.A. Monitoring Sandy Shore Morphologies by DGPS – A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, v. 24, n.6, p.1516-1528, 2008.

CALDAS, L. H. O. **Late quaternary coastal evolution of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil**. 2002. 92f. PhD Thesis, Kiel University, Germany, 2002.

CHAVES, M.S.; VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; SANTOS, D.A.S.. Beach Morphodynamics of the Serra Oil Field (NE, Brazil). *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 594-597. 2006.

ESTEVEZ, 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.

FERREIRA, A.T.S.. **Monitoramento Ambiental da Costa do Rio Grande do Norte com base em Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. 2013. 165f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica). Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Natal. 2013.

HUANG, J. D.; JACKSON, D.W.T.; COOPER, J. A.G. Morphological Monitoring of a High Energy Beach System Using GPS and Total Station Techniques, Runkerry, Co. Antrim, Northern Ireland. *Journal of Coastal Research*, No. 36, pp. 390-398, ISSN 0749-0208. (DOI: 10211/08-1108.1). 2002.

IDEMA. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do RN. In: **Informativo Municipal – Macau**. Natal/RN, v. 05, p;1-14. 1998.

KLEMAS, V. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. *Journal of Coastal Research*, v. 27, n. 2, p. 2- 17, 2011.

LEE, J. M., PARK, J.Y., CHOI, J.Y., Evaluation of Sub-aerial Topographic Surveying Techniques Using Total Station and RTK-GPS for applications in Macro-tidal Sand Beach Environment. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 535-540, ISSN 0749-0208. 2013.

MATOS, A.C.O.C. **Implementação de modelos 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. 2005.

MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E. Oscillatory Coastal Wave and Currents Profile in the Northern Continental Shelf of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. In: **International Geoscience Programme**, 5, 2011, Sidney. Abstract. Sidney: UNESCO/IUGS/Project 526, 8p, 2011.

MATOS, M.F.A.; FORTES, C.J.E.M.; AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C. Análise Comparativa da Agitação Obtida com o Modelo Numérico (SWAN) na Modelagem de Ondas do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil e Dados de Campo. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 3, p. 289-299, 2013.

- MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS**. São Paulo: Editora Unesp, p.477, 2008.
- MORTON, R.A.; LEACH, M.P.; PAINE, J.G.; CARDOZA, M.A. Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. **Journal of Coastal Research**, 9, 702–720. 1993.
- NASCIMENTO, M.C. **A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera**. 2009. 229f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Natal. 2009.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2ed., IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – SUPREN (Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1989.
- ROCHA, C.P.; ARAUJO, T.C.M.; MENDONÇA, F.J.B. Methodology for Shoreline location using the 3D-GPS positioning: a case study at Sauaçu beach, Brazilian Northeast. **Journal of Coastal Research**, Jul 2009, v. 25, n. 4, p. 1052-1058, 2009.
- SANTOS, A. L. S. **Monitoramento da morfologia Costeira em setores da bacia potiguar sob a influência da indústria petrolífera utilizando geodésia de precisão e laser escâner terrestre**. 150f. 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. 2014.
- SANTOS, A.L.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T.; FERREIRA, A.T.S. Variação da Linha de Costa no Litoral Setentrional do RN através de levantamentos GNSS e análise multitemporal. In: **SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA**, 9º SINAGEO, Rio de Janeiro, 2012a.
- 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. . 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** (Impresso), v. 63, p. 663-681, 2011.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V. E. ; 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** (Fortaleza), v. 25, p. 1-12, 2012b.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; FERREIRA, A.T.S.; SANTOS, A. L. S. Altimetria GNSS de precisão aplicada ao monitoramento da dinâmica sedimentar costeira de curta duração em escala regional. **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. Artigos, Curitiba, v. 19, no 4, p.624-638, out-dez, 2013.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2013, no prelo.
- SOUTO, M.V.S. Análise multitemporal dos elementos geoambientais da Planície estuarina de Região da Ponta do Tubarão, área de influência dos campos petrolíferos de Macau e Serra, Município de Macau, RN. 2004. 114p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2004.
- 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.
- VITAL, H.; STATTEGGER, K.; AMARO, V. E.; SCHWARZER, K.; FRAZÃO, E. P.; TABOSA, W. F. Modern high-energy siliciclastic-carbonate platform: Brazilian Continental Shelf Adjacent to Northern Rio Grande do Norte State, NE Brazil. SEPM Special Publication on Advances in Shallow-marine sedimentology. **Journal of Sedimentary Research**, v. 90, p. 100, 2008.
- 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.

Trabalho enviado em julho de 2015
Trabalho aceito em agosto de 2015

