

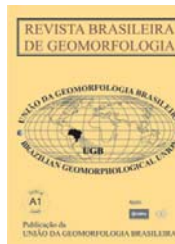


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 16, nº 1 (2015)

NOTA TÉCNICA



MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO DA PRAIA DO GUINCHO, CONSELHO DE CAISCAIS (PORTUGAL), BASEADO EM MÉTODO GEODÉSICO DE PRECISÃO

GEOMORPHOLOGIC MAPPING OF GUINCHO BEACH, CASCAIS COUNCIL (PORTUGAL), BASED ON PRECISION GEODETIC METHOD

Marcelo Soares Teles Santos

*Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Rua Rui Barbosa, 710, Centro, Cruz das Almas, Bahia, CEP: 44.380-000, Brasil
Email: mstsantos@yahoo.com.br*

Venerando Eustáquio Amaro

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário Lagoa Nova, Natal, Rio Grande do Norte, CEP: 59.078-970, Brasil
Email: amaro@geologia.ufrn.br*

Anderson Targino da Silva Ferreira

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário Lagoa Nova, Natal, Rio Grande do Norte, CEP: 59.078-970, Brasil
Email: andersontsferreira@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
31/03/2014
Data de Aprovação:
22/02/2015

Palavras-chave:

Levantamento com Geodésia de Precisão; Monitoramento Costeiro; Mudanças Climáticas.

Keywords:

Precise Geodetic Survey;
Coastal Monitoring; Climate Changes.

Resumo:

Estudos realizados na zona costeira do Concelho de Cascais (Portugal) revelaram diferenças significativas no padrão geomorfológico das praias que, por consequência, responderão de forma diferenciada às estimativas de alterações climáticas futuras, notadamente quanto a elevação do nível médio do mar. Essas características apontaram a necessidade de desenvolvimento e aplicação de métodos para modelagem e monitoramento multitemporal de variações morfológicas, essenciais em projetos de mitigação de impactos ambientais. Este trabalho tem como objetivo fornecer contribuições aos estudos geomorfológicos da Praia do Guincho, a partir da modelagem digital de elevação (MDE) de alta precisão. Nesse método, os pontos amostrais definidores da linha de costa e da superfície de praia foram determinados com precisão centimétrica em relação aos referenciais geodésicos planialtimétricos adotados oficialmente no território português, os quais são unívocos, fixos e relativamente estáveis no tempo, pelo posicionamento e altimetria *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Os resultados permitiram: acurácia decimétrica do MDE, modelagens morfológicas e do padrão de distribuição do relevo praias, extração de perfis, classificação do estágio morfodinâmico praias e obtenção de informações quantitativas importantes, tais como área e perímetro emersos, volume de sedimentos acima da superfície de nível médio do mar e frequências das altitudes ortométricas.

Qualidades específicas do método foram assinaladas para o adequado monitoramento das alterações praias em escalas de curta duração e detalhe, com aplicações em estudos relacionados ao estoque, transporte e suprimento sedimentares, indicadores relevantes aos estudos sobre os impactos futuros das alterações climáticas nas praias do Concelho de Cascais.

Abstract:

Studies in the coastal zone of the Municipality of Cascais (Portugal) revealed significant differences in geomorphological patterns of the beaches which, consequently, will respond differently to future estimations of climate changes, especially regarding mean sea level rising. These characteristics pointed out the need for development and implementation of methods for monitoring and modeling of multitemporal morphological changes, essential in projects of mitigation of environmental impacts. This work aims to contribute to geomorphological studies on Guincho Beach based on high accuracy digital elevation modeling. In this method, the sampling points defining coastline and beach surface were determined with centimetric precision in relation to the planialtimetric geodetic referential adopted officially in Portuguese territory, which are unambiguous, fixed and relatively stable in time, by positioning and altimetry of the Global Navigation Satellite System (GNSS). The results allowed: MDE with decimetric accuracy, morphological modeling and pattern distribution of beach relief, profile extraction, classification of beach morphodynamic stage, and obtaining important quantitative information, such as area and perimeter of beach face, volume of sediments above the mean sea level and frequencies of orthometric height. Method-specific qualities were highlighted to proper monitoring of beaches changes in short-term and detailed scales, with applications in studies related to stock, transport and sediment supply, relevant indicators to studies on future impacts of climate change on the beaches of the Municipality of Cascais.

1. Introdução

O “Plano estratégico de Cascais face às alterações climáticas” (TABORDA *et al.*, 2010) caracterizou os principais aspectos meteorológicos e oceanográficos ativos na zona costeira do Concelho de Cascais, que abrange as praias do Guincho, Cascais e Carcavelos, e relacionou-os à sua organização geomorfológica, conteúdos sedimentares e ritmos de evolução atuais e futuros. As praias foram categorizadas em função dos principais impactos das alterações climáticas no litoral, de acordo com os diferentes tipos de morfologia costeira e dos elementos responsáveis por alterações sedimentares nas praias, tais como abastecimento sedimentar, posição relativa do nível do mar e atividade das ondas. De acordo com as análises realizadas, a elevação do nível médio do mar, a variação direcional do regime de agitação, a diminuição da precipitação e o aumento da temperatura foram apontados como os prováveis responsáveis por alterações futuras na morfologia das praias.

Na Praia do Guincho, especificamente, elevação do nível médio do mar e variação na agitação marítima foram os fatores de maior impacto esperado em relação às estimativas de alterações climáticas, estando este último como o fator mais influente, classificada relativamente como nível moderado nos dois fatores,

sendo os níveis de classificação utilizados: reduzido, moderado, elevado e muito elevado (TABORDA *et al.*, 2010). As alterações no clima de agitação marítima deverão resultar em reajuste na configuração planar das praias e redução da superfície areal, em que a Praia do Guincho foi apontada como uma das mais vulneráveis a esse aspecto; no cenário menos favorável poderá perder até 20% da superfície útil. A elevação do nível médio do mar, com magnitude máxima esperada entre 0,5 e 1,4 m no ano de 2100 (RAHMSTORF, 2007), resultará na redução da largura das praias e, conseqüentemente, na superfície útil. Apesar do efeito desse elemento ser menor na Praia de Cascais em relação às demais praias, em um cenário de elevação mais desfavorável prevêem-se reduções da superfície atual entre 10 e 20% em 2050 e entre 50 e 80% em 2100.

Essas características peculiares da área de estudo apontam para a necessidade de desenvolvimento e aplicação de métodos para modelagem e monitoramento das variações morfológicas dos setores praias, com intuito de identificação de eventuais alterações anômalas ao longo do tempo e, com isso, subsidiar projetos para mitigação de impactos ambientais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo fornecer contribuições aos estudos geomorfológicos da Praia do Guincho, a

partir da modelagem digital de elevação de precisão. A modelagem é realizada a partir do posicionamento e altimetria *Global Navigation Satellite System* (GNSS), que permitem a determinação de coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas de pontos amostrais definidores de Linhas de Costa (LC) e superfícies de praia com precisão de poucos centímetros em relação aos referenciais geodésicos (planimétrico e altimétrico) adotados oficialmente no território português, os quais são unívocos, fixos e relativamente estáveis no tempo.

O método é adequado aos estudos de precisão em Geomorfologia na mensuração da dinâmica costeira (erosão/acresção sedimentar) de curta duração, pois, os empregos desses referenciais geodésicos, unidos ao posicionamento de precisão e à definição apropriada de LC, permitem a repetição dos levantamentos ao longo do tempo sempre atribuídos aos mesmos referenciais e com precisões compatíveis às dimensões das feições morfológicas costeiras e às variações sedimentares ocorridas em escala de tempo de curta duração (intra-anual e interanual). Tais características têm permitido a detecção de mudanças morfológicas de curta duração (intra-anual e interanual) ao nível de detalhe em litorais arenosos no Brasil (AMARO *et al.* 2015; SANTOS & AMARO, 2013; SANTOS; AMARO; SOUTO, 2012; SANTOS & AMARO, 2011). Por exemplo, foi aplicado

em praias arenosas expostas, interceptadas por canais de maré intermitentes, pertencentes a um sistema de ilhas barreiras de elevada dinâmica sedimentar, localizado no Nordeste do Brasil (SANTOS & AMARO, 2013), no qual foi realizado o monitoramento das mudanças morfológicas da LC e da superfície de praia em escala trimestral. Nesse caso, os resultados permitiram mensurar a intensa erosão costeira ocorrida nas praias expostas e ilhas barreiras, analisar a recuperação das praias, e identificar as prováveis causas da ampla erosão/deposição nas zonas de praia, pela correlação com a atuação dos agentes dinâmicos costeiros (ventos, ondas, marés e correntes), na escala local a regional, e com a repercussão na região das alterações no padrão de chuvas e ventos provocados pela ação do fenômeno global *El Niño* Oscilação Sul.

2. Área de Estudo, Rede Geodésica e Modelo Geoidal de Referência

Este item apresenta a área do estudo de caso (Figura 1) e a infraestrutura geodésica portuguesa utilizada nos levantamentos (Figura 2): a rede geodésica de referência que serviu de apoio básico ao transporte de coordenadas geodésicas, e o modelo geoidal utilizado na altimetria GNSS.

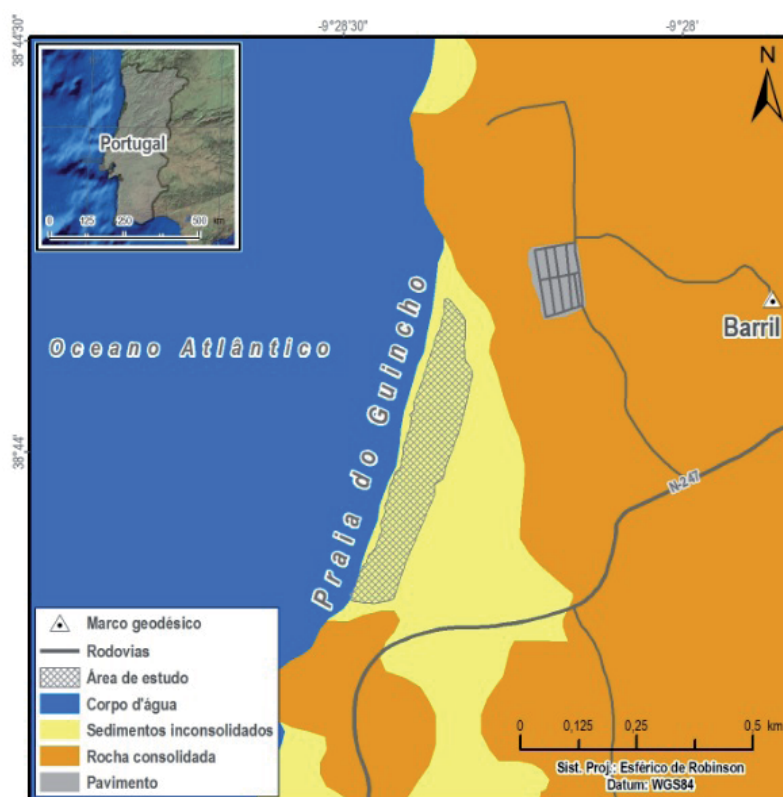


Figura 1 - Mapa de localização da Praia do Guincho, Concelho de Cascais (Portugal). O triângulo indica a localização do marco geodésico "BARRIL", da rede geodésica passiva, a aproximadamente 600 m da praia.

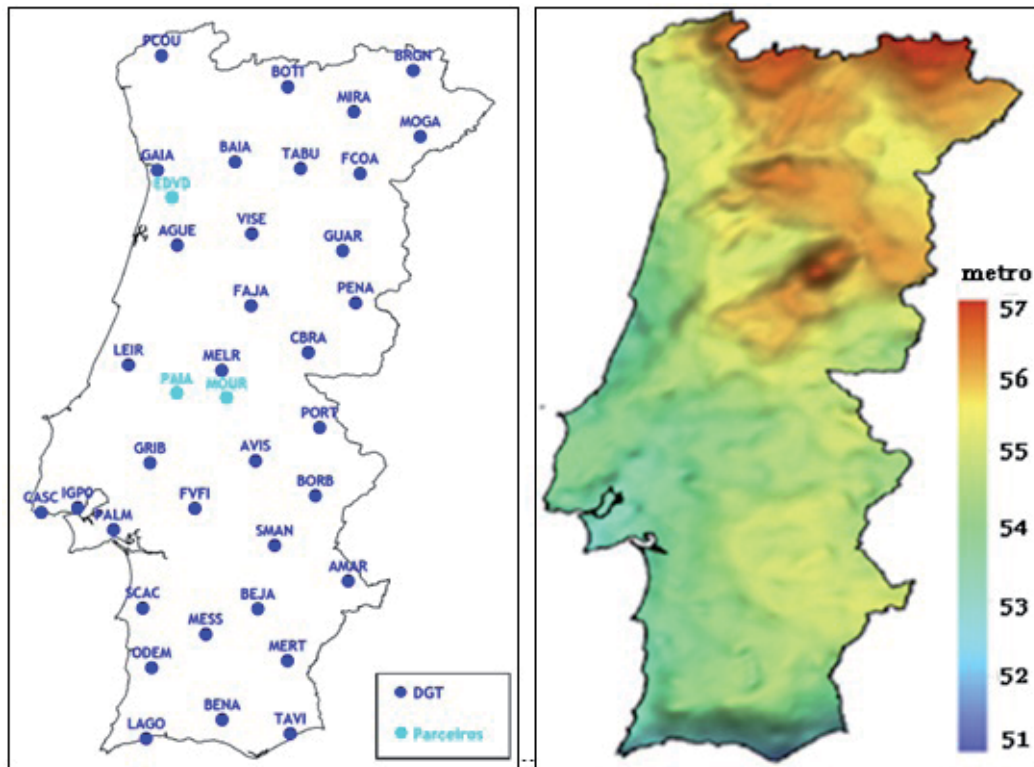


Figura 2 - Ilustração da infraestrutura geodésica do continente português utilizada nos levantamentos: a) estações da rede geodésica ativa - RENE; e b) modelo geoidal continental - GEODPT08. Fonte: IGP (2012).

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O Concelho de Cascais é uma região geologicamente caracterizada por rochas sedimentares carbonáticas de idade mesozóica, incluindo também materiais ígneos e sedimentares detríticos de mesma idade a mais recentes (RAMALHO *et al.*, 2001). A Praia do Guincho, que possui uma densidade de ocupação de baixa a nula, é uma das poucas áreas com depósitos holocênicos da região, encaixa-se entre um litoral predominantemente granítico a norte, com altitudes que atingem 100 m, e por falésias esculpidas em maciços carbonático carsificados a sul que alcançam cotas mais baixas da ordem de 20 m. A conformação morfodinâmica e o conteúdo sedimentar na área de estudo é resultado da ação da agitação marítima e pelo afluxo de ventos fortes que variam entre 3,0 e 20,0 m/s provenientes de Norte e Noroeste, da posição relativa do nível médio do mar e dos fatores meteoceanográficos. As mesomarés semidiurnas possuem amplitude em torno de 3,57 metros entre baixamar (0,46 m) e preamar (4,03 m), e ocorrem elevações temporárias superiores a 1 m no nível médio do mar provocadas por condições meteorológicas anômalas (TABORDA & DIAS, 1992; ANTUNES & TABORDA,

2009). A altura significativa média das ondas é de 1,97 m, alcançando valores superiores a 10 m nos meses de Janeiro e Fevereiro. O período de pico médio é de 10,4 s e as direções predominantes entre WNW e NNW. Os principais agentes atuantes na contribuição sedimentar por erosão hídrica superficial para a área de estudo, bacias hidrográficas afluentes ao litoral de Cascais e a erosão das falésias adjacentes, aportam cerca de 1734 m³/ano na situação de referência (1941-1970), valor considerado de reduzida intensidade. Na porção norte da Praia do Guincho as camadas carbonáticas inclinam-se para S, enquanto no topo sul as rochas inclinam-se para N, definindo o chamado sinclinal do Guincho, que na zona central possui um afloramento de rocha basáltica interpretado como uma chaminé vulcânica, que marca um das fases ligadas à abertura e desenvolvimento do Oceano Atlântico.

2.2. Rede Geodésica de Referência

A Rede Nacional de Estações Permanentes (RENEP) (IGP, 2012) do GNSS, implantada e mantida pelo Instituto Geográfico Português (IGP), foi utilizada como referência no transporte de coordenadas geodésicas.

A RENEP é a rede de referência ativa adotada oficialmente em Portugal e possui, atualmente, 38 estações operacionais. Além de fornecer coordenadas precisas das estações, a RENEP coleta observações dos satélites GNSS continuamente nas duas frequências (L1 e L2) e disponibiliza-os na página do IGP na internet (IGP, 2012). Isso possibilita a qualquer usuário, com apenas um receptor, realizar o posicionamento relativo. Os arquivos das sessões de observações de cada estação da RENEP são disponibilizados no formato RINEX (*Receiver Independent data EXchange format*). Os arquivos RINEX possuem formato padrão, podendo ser utilizados por qualquer programa de processamento GNSS.

As coordenadas geodésicas das estações da RENEP são disponibilizadas em ETRS89 (*ETRS – European Terrestrial Reference System*), sistema de referência global recomendado pela EUREF (*European Reference Frame*), subcomissão da Associação Internacional de Geodésia (IAG - *International Association of Geodesy*), estabelecido através de técnicas espaciais de observação. No simpósio da EUREF realizado em 1990, na Itália, foi adotada a seguinte resolução: “A Subcomissão da IAG para o referencial geodésico europeu (EUREF) recomenda que o sistema a ser adotado pela EUREF seja coincidente com o ITRS89 (na época de 1989.0) e fixado à parte estável da Placa Euro-Asiática, sendo designado por Sistema de Referência Terrestre Europeu 1989 (ETRS89)” (IGP, 2012). O estabelecimento do ETRS89 em Portugal Continental, segundo o IGP (2012), foi efetuado com base em campanhas internacionais (realizadas em 1989, 1995 e 1997) que tiveram como objetivo ligar convenientemente a rede portuguesa à rede europeia. Nos anos subsequentes, toda a Rede Geodésica de 1ª e 2ª ordens do Continente foi observada com GNSS, tendo o seu ajustamento sido realizado com a fixação das coordenadas dos pontos estacionados nas campanhas internacionais anteriores.

2.3. Modelo Geoidal de Referência

O modelo geoidal utilizado na altimetria GNSS foi o “Geóide para Portugal Continental” (GEODPT08), desenvolvido pelo IGP e que consiste em um GRID de 1,5’ em 1,5’ de alturas geoidais referentes ao elipsóide GRS80, o mesmo utilizado no sistema de referência ETRS89 (IGP, 2012). O modelo foi desenvolvido a partir do modelo geoidal gravimétrico *Iberia-Canarias-*

-Azores Geoid Model 2007 (ICAGM07), determinado pela função de Stokes modificada com uso de dados gravimétricos terrestres, marinhos e de altimetria por satélite, modelo digital do terreno de elevada precisão, e o mais recente modelo geopotencial calculado com dados da missão GRACE (EIGEN05C). Sobre o modelo geoidal foi realizado ajustamento às redes geodésicas planimétrica (passiva) e altimétrica do continente, onde foram utilizadas 137 Referências de Nível (RN) da Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão (RNGAP) e 1020 vértices planimétricos da Rede Geodésica Nacional (RGN).

No ajustamento foi modelada uma superfície de separação entre o modelo geoidal e a rede altimétrica, a qual representou as discrepâncias não desprezíveis entre os diferentes sistemas de referência. Assim, o modelo GeodPT08 não é uma superfície equipotencial do campo gravítico da Terra, e, conseqüentemente, não é verdadeiramente “o geóide”, mas apenas uma superfície de conversão entre altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas. Avaliações realizadas no GeodPT08 a partir das redes geodésicas continentais utilizadas revelaram que o posicionamento vertical com esse modelo possibilita uma acurácia global estimada de 4 cm, adequada para modelagem e monitoramento temporal de superfícies praias (IGP, 2012). Com uso do GeodPt08 as altitudes são vinculadas ao nível médio do mar materializado no marégrafo de Cascais (*Datum* altimétrico), distante aproximadamente 6 km da área de estudo.

3. Metodologia

A LC e o MDE da Praia de Cascais foram determinados a partir da coleta de pontos topográficos planialtimétricos ao longo das feições que as definiram na época do levantamento, em Abril de 2012. O levantamento planialtimétrico foi realizado pelo posicionamento e altimetria GNSS de precisão (MONICO, 2007; SEEBER, 2003) em relação aos referenciais planialtimétricos adotados oficialmente no território português. A metodologia consistiu em cinco etapas (SANTOS & AMARO, 2013; SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011): 1) implantação de estação de referência e transporte de coordenadas geodésicas pelo posicionamento GNSS; 2) determinação das coordenadas geodésicas dos pontos amostrais de LC e MDE das praias arenosas, pelo

posicionamento GNSS; 3) determinação das altitudes ortométricas dos pontos amostrais pela altimetria GNSS; 4) geração das LC e dos MDE das superfícies de praia a partir dos pontos amostrais; e 5) avaliação estatística dos MDE.

A estação de referência foi implantada na área de estudo para servir como referência geodésica e fornecer linhas de base curtas ao posicionamento GNSS dos pontos amostrais de LC e MDE. O transporte de coordenadas geodésicas dessa estação foi realizado pelo posicionamento GNSS no modo relativo estático a partir de duas estações geodésicas ativas da RENEP, as quais possuem coordenadas geodésicas com precisão decimétrica em relação ao sistema ETRS89. As estações utilizadas foram a CASC e a LAGO localizadas, respectivamente, a 6 e a 190 km da estação de referência. Por envolver uma linha de base média (maior do que 100 km), o processamento foi realizado com observações da fase da onda portadora em duas frequências (L1 e L2), sessão média (2h30 min) e uso de efemérides precisas. O uso de duas estações permitiu a estimativa de precisão das coordenadas no ajustamento das observações. Mais informações sobre transporte de coordenadas podem ser encontradas em Monico (2007).

As coordenadas geodésicas dos pontos amostrais de LC e MDE foram determinadas pelo posicionamento GNSS no modo relativo cinemático em relação à estação de referência implantada na área de estudo (MONICO, 2007). A aquisição de dados foi feita em duas etapas: a) o levantamento da LC (limite externo do MDE), definida como o limite do espraiamento das ondas na face de praia submersa na maré em preamar, ou seja, o alcance máximo da linha d'água, como sugerido por Santos *et al.* (2011); e b) o levantamento de superfícies de praia (área interna do MDE), que incluem toda a praia emergida, ou seja, a face de praia, a crista da berma e a berma até uma feição morfológica com variação topográfica significativa do terreno, tal como campos de dunas, como em Baptista *et al.* (2008). Por envolver linhas de base curtas os processamentos foram realizados com observações da fase da onda portadora L1 e a solução de fixação de ambiguidades como valores inteiros. O receptor móvel foi transportado por um operador a pé com taxa de gravação de 1 segundo.

As altitudes ortométricas dos pontos amostrais de LC e MDE, referenciadas à superfície de nível médio

dos mares (modelo geoidal), foram calculadas a partir das altitudes geométricas obtidas por GNSS e referidas à superfície do elipsóide de revolução adotado no posicionamento. Isso foi feito através da altimetria por GNSS no modo absoluto, na qual, a altitude ortométrica de um ponto de interesse (i) na superfície terrestre é determinada pela seguinte relação (SANTOS & AMARO, 2013; MONICO, 2007; FEATHERSTONE, 1998):

$$H_i = h_i - N_i \quad (1)$$

onde, H_i , h_i , N_i são, respectivamente, a altitude ortométrica, a altitude geométrica e a altura geoidal do ponto.

As alturas geoidais foram obtidas no modelo geoidal GeodPT08, desenvolvido pelo IGP (IGP, 2012), o qual foi compatibilizado à rede de nivelamento ao nível de acurácia decimétrica.

Na geração dos MDE foi utilizada a interpolação por triangulação com uso da técnica *Triangulated Irregular Network* (TIN), que consiste em estrutura onde os 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 (ZANARDI, 2006; MATOS, 2005). O controle de qualidade dos MDE, que avalia a sensibilidade do modelo em representar feições morfológicas praias, foi realizado a partir do cálculo das discrepâncias das altitudes obtidas no modelo analisado (H_i^m) e as de referência (H_i^r), pela expressão:

$$\Delta H_i = H_i^m - H_i^r \quad (2)$$

Em amostras com $i = 1, 2, 3, \dots, n$ pontos de controle selecionados aleatoriamente na área de estudo e que não foram usados na geração dos modelos. Para o conjunto de discrepâncias (ΔH_i) das altitudes, a medida de acurácia foi dada pelo Erro Quadrático Médio (EQM), conforme a equação (MONICO, 2009 *apud* MIKHAIL & ACKERMANN, 1976):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \quad (3)$$

4. Resultados e Discussão

4.1. Modelo Digital de Elevação e Controle de Qualidade

A Figura 3 apresenta o MDE da Praia do Guincho, resultante do levantamento geodésico realizado em Abril de 2012. O modelo foi representado no sistema de projeção plana UTM (Fuso 29) e no sistema de referência geodésico ETRS89. As curvas de nível foram geradas com equidistância vertical de 0,5 m. Para aprimorar a visualização dos modelos a tabela de cores foi aplicada com variações de 0,5 m, do azul escuro (al-

titude ortométrica menor) ao vermelho escuro (altitude ortométrica maior). Na aquisição de dados, a área de 6,0019 ha, com perímetro de 1.546,76 m, foi medida com 3.118 pontos amostrais em aproximadamente 1,5 h, resultando numa taxa de aquisição de aproximadamente 35 pontos por minuto. A Figura 4 apresenta o histograma de frequência das altitudes ortométricas, que tiveram média de 2,681 m, desvio padrão de 1,802 m, mínima de 0,646 m e máxima de 7,372 m. O volume de sedimentos acima da superfície de nível médio do mar foi de 125.289,52 m³.

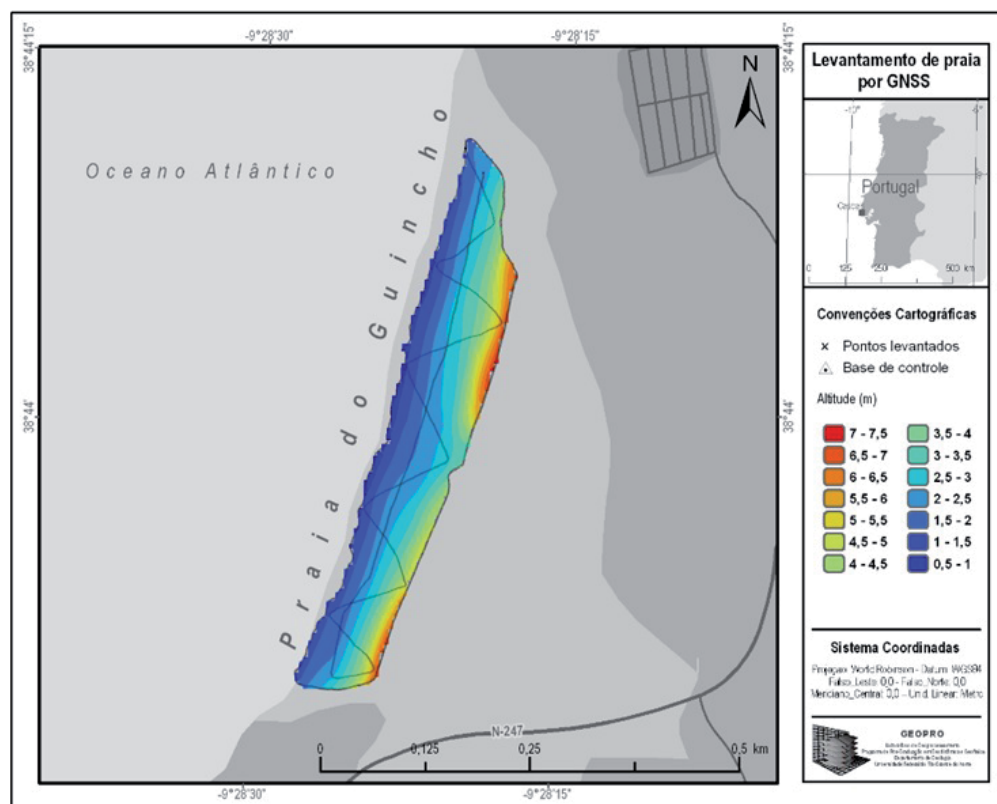


Figura 3 - Ilustração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da praia de Cascais, Portugal, em abril de 2012. A linha pontilhada no MDE representa o caminho percorrido na coleta dos pontos amostrais, com intervalo de 1s.

As precisões das coordenadas geodésicas da estação de referência (transporte de coordenadas em relação às estações da RENEP) foram de 0,042 m em E, 0,040 m em N e 0,099 m em h, enquanto dos pontos amostrais (combinação dos erros da estação de referência e das linhas de base processadas) foram de 0,045 m em E, 0,041 m em N e 0,100 m em h. Considerando que as altitudes geométricas tiveram precisão estimada de 0,100 m e as alturas geoidais de 0,040 m (erro do modelo geoidal GeodPT08), a precisão da alti-

tude ortométrica, calculado pela Equação 1, foi estimada em 0,104 m, de acordo com a teoria da propagação de variâncias (GEMAEL, 1984):

$$s_H = \sqrt{s_h^2 + s_N^2} \quad (4)$$

onde, s_H , s_h e s_N são, respectivamente, as precisões estimadas da altitude ortométrica, altitude geométrica e da altura geoidal.

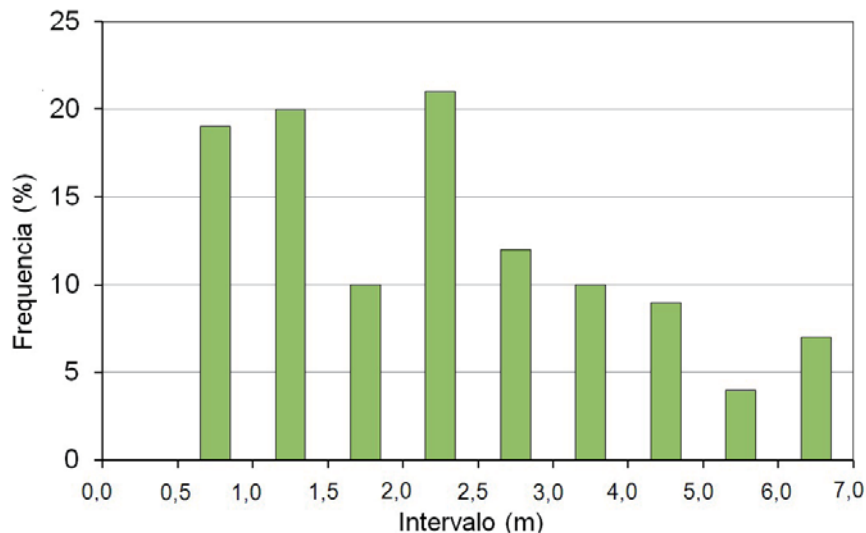


Figura 4 - Histograma de frequência das altitudes da Praia do Guincho, em abril de 2012.

No controle de qualidade do MDE foram estabelecidos 10 pontos de controle que resultaram em conjunto de discrepâncias (Equação 2) com EQM de 0,135 m (Equação 3), média de -0,029 m e desvio padrão de 0,089 m. O tamanho da amostra (n) necessária à adequada análise estatística foi calculado através da expressão (MARTINS, 2006; ZANARDI, 2006):

$$n = \frac{Z^2 \gamma^2 N}{(N-1)\varepsilon_r^2 + Z^2 \gamma^2} \quad (5)$$

onde, Z é o intervalo de confiança, s é o desvio padrão amostral, \bar{x} é a média amostral, $\gamma = s/x$, N é o tamanho da população, ε é o erro amostral, e ε_r é o erro amostral relativo ($\varepsilon_r = \varepsilon/x$) (MARTINS, 2006; MONTGOMERY & RUNGER, 2003). O valor calculado de n deve ser considerado estatisticamente suficiente para as análises se seu valor for menor do que o tamanho da amostra inicial utilizada. Para a população de 3.118 pontos amostrais, intervalo de confiança de 90 % ($Z=1,6449$) e erro amostral de 0,05 m, o valor de n calculado foi de 8,5, ou seja, a amostra com 10 pontos de controle coletados em campo foi estatisticamente suficiente para as análises estatísticas.

4.2. Análises Geomorfológicas

A partir do MDE (Figura 3) foi possível modelar as principais formas morfológicas típicas de face de praia encontradas na Praia do Guincho e identificar os padrões de distribuição espacial do relevo. A Figura 5

ilustra o MDE em perspectiva para melhor visualização das feições morfológicas. Destacam-se feições de dunas frontais (*foredune*), comuns em praias dissipativas e intermediárias (MUEHE, 2001), onde as elevações estão representadas em tons de amarelo e vermelho; e a feição de um canal de drenagem localizado na porção central da imagem, encaixada entre o cordão de dunas frontais. Nos exemplos ilustrados, fica evidente a relação entre os aspectos de relevo, independente da posição espacial, pois, estão georreferenciados e relacionados ao mesmo referencial altimétrico com precisão relativa de poucos centímetros. Assim, como esperado, verifica-se que as altitudes das dunas frontais são mais elevadas do que as altitudes do canal de drenagem. Ainda, a comparação entre MDE distintos ao longo do tempo permitirá o monitoramento temporal das feições modeladas presentes na zona de praia, que poderão ser relacionados às informações sobre a agitação marítima e ventos, em caráter de monitoramento sistemático. O histograma de frequência das altitudes (Figura 4) indicou altas frequências, maiores que 3,0 m, enquanto o MDE ilustrou que essas altitudes ocorrem no setor de dunas frontais, que cumprem a função de armazenadoras dos sedimentos transportados pelos ventos.

A Figura 6 ilustra três perfis de praia extraídos do MDE e utilizados na definição do estágio morfodinâmico da praia. Vale ressaltar que perfis localizados em outros trechos da praia podem ser extraídos, pois a metodologia 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. O estágio

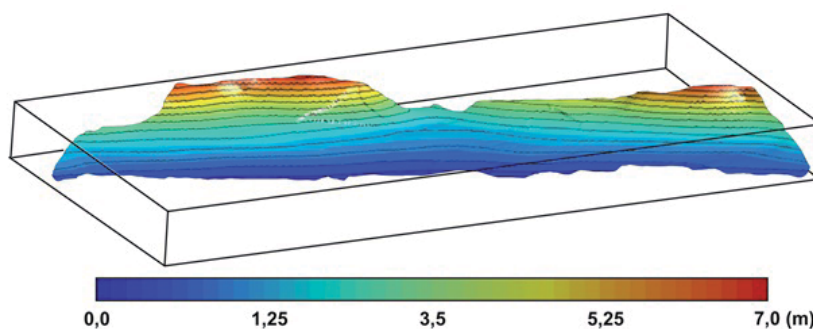


Figura 5 - Visualização do Modelo Digital de Elevação da Praia do Guincho de abril de 2012, em perspectiva para melhor identificação das feições morfológicas modeladas.

morfodinâmico da praia foi obtido a partir da metodologia adotada por Souza (1997) baseada em informações de declividade da face de praia, da seguinte maneira: declividade menor do que 2° para estágio dissipativo, declividade entre 2° e 4° para estágio intermediário, e declividade maior do que 4° para estágio refletivo. A vantagem desse método é oferecer uma rápida avaliação empírica do estágio praiial apenas com base nas declividades obtidas em perfis de praia levantados em campo ou em MDE de alta precisão, como no presente trabalho.

Desse modo, a partir do emprego dessa metodologia, o Perfil A, com uma inclinação de $2,4^\circ$, sugere estágio morfodinâmico de praia do tipo intermediário; o

Perfil B, com $1,5^\circ$ de inclinação, aponta para uma praia com um estágio dissipativo; e o Perfil C, com $2,1^\circ$ de inclinação, indica estágio praiial também intermediário. Segundo Muehe (2001), os estágios intermediários são desenvolvidos a partir de um perfil dissipativo numa sequência acrecional com a face de praia mais íngreme que no perfil dissipativo. No entanto, no Perfil B, o estágio dissipativo decorre da presença de um canal de drenagem que atravessa a praia na sua porção central, rebaixando e aplainando o terreno. A feição de canal de drenagem encaixada entre o cordão de dunas frontais (Figura 5) evidencia um processo erosivo instalado de origem pluvial.

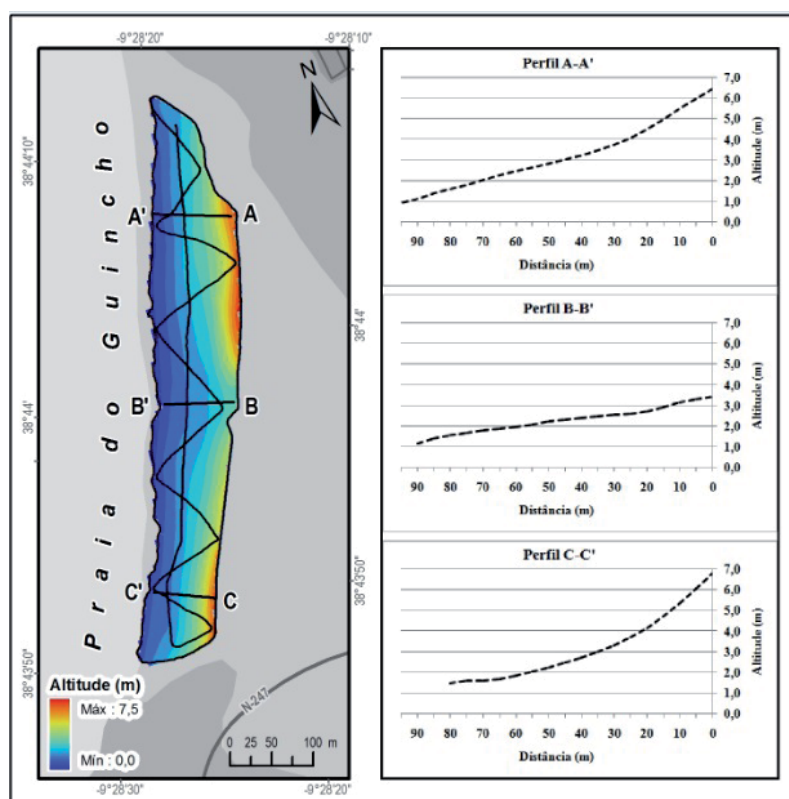


Figura 6 - Perfis de praia extraídos do Modelo Digital de Elevação da Praia do Guincho de abril de 2012, utilizados na definição do estágio morfodinâmico.

4.3. Considerações sobre o Monitoramento Temporal das Praias do Concelho de Cascais

De acordo com os dados disponíveis no “Plano Estratégico de Cascais face às alterações climáticas” (TABORDA *et al.*, 2010), as praias do Concelho de Cascais exibem uma variabilidade na retenção sedimentar a escalas temporais curtas e de elevada magnitude. Durante o verão ocorre o “engordamento” das praias e a área útil é máxima; no inverno ocorre o “emagrecimento” das praias, que podem ser completamente inundadas em episódios de tempestades. Assim, as alterações sedimentares das zonas de praia ocorrem não só pela tendência de longo prazo, associada às alterações climáticas, mas também por oscilações de carácter sazonal a interanual e em condições de eventos extremos. Nas análises realizadas, as evidências apontaram para a existência de suprimento sedimentar na Praia do Guincho, uma vez que apesar do sistema dunar consistir em sumidouro de sedimentos, com magnitude relevante, não ocorre erosão intensa na praia. Por outro lado, nas praias da costa sul do Concelho de Cascais, os elementos disponíveis são extremamente escassos e é geralmente assumido que não existem fontes sedimentares relevantes, pois essas praias constituiriam sistemas fechados. Assim, dentre as praias do Concelho de Cascais, a morfologia da Praia do Guincho a torna menos vulnerável aos cenários previstos de elevação do nível médio do mar, que afetará essencialmente a largura e a forma das praias, com redução da superfície útil.

Nesse contexto de área de estudo, a metodologia aqui apresentada poderá auxiliar em análises importantes relacionadas com estoque, suprimento e transporte sedimentar ocorrentes nas praias do Concelho de Cascais. A partir da extração de informações quantitativas temporais dos MDE das diversas praias, tais como área e perímetro emersos, volume de sedimentos e frequência das altitudes acima do nível médio do mar, será possível analisar a variabilidade espacial e temporal da dinâmica sedimentar da área de estudo. Tais dados têm relevantes implicações na avaliação do estoque, transporte e suprimento de sedimentos entre as praias, além de possibilitarem a identificação das fontes de sedimentos externos ou trocas sedimentares internas às praias do Concelho de Cascais. No entanto, tais análises somente serão possíveis devido à adoção da superfície de nível médio dos mares como referência nos cálculos de estoque sedimentar, o volume acima do nível médio

do mar, pois, como as altitudes ortométricas foram relacionadas ao *datum* altimétrico do sistema geodésico português, essa superfície de nível é a mesma para todas as praias. Assim, a modelagem regional poderá criar uma visão panorâmica das morfologias e suas variações temporais nas praias do Concelho de Cascais relacionadas ao mesmo referencial altimétrico. Além disso, as características principais da metodologia proposta, quais sejam a acurácia e o emprego de referenciais geodésicos ajustados, permitirão que as variações temporais sejam mensuradas com precisão e na escala de tempo de curta duração (intranual e interanual), apropriadas ao monitoramento das alterações sedimentares típicas de ambientes com amplas variações do estoque sedimentar (sazonal ou apenas verão/inverno).

5. Conclusões

Em função dos impactos previstos na região do Concelho de Cascais frente às alterações climáticas, assim como a consequente necessidade de monitoramento contínuo das alterações morfológicas presentes e futuras, o método aplicado mostrou-se eficiente devido aos aspectos principais: MDE de precisão da face praial, georreferenciado e com altitudes ortométricas relacionadas ao sistema geodésico português. Por ser um produto de precisão planialtimétrica decimétrica (alguns centímetros), permite a modelagem das principais feições morfológicas costeiras e de suas variações temporais na escala de curta duração (intranual e interanual). Por ser um produto georreferenciado, o modelo fornece a localização geográfica das feições morfológicas presentes na face de praia à época do levantamento, além de suas interrelações espaciais, o que o torna útil na compreensão das variações morfológicas no domínio espacial. O georreferenciamento permite ainda a comparação multitemporal dos MDE, o que possibilita a análise da morfodinâmica praial no domínio temporal, no mesmo nível de detalhamento em que as feições morfológicas foram modeladas. Por ser um produto relacionado ao sistema geodésico português, as altitudes ortométricas das feições morfológicas poderão ser comparadas com as de outros modelos na área de estudo ou em outras áreas, além de fornecer apropriada precisão altimétrica em relação ao nível médio dos mares.

A comparação entre levantamentos sucessivos de uma determinada praia, realizados pelo mesmo método e os mesmos referenciais, permitirá o acompanhamento

das variações espaciais e temporais do estoque sedimentar entre os intervalos de monitoramento adotados e em relação a uma situação inicial de referência. Nesse caso, o MDE da Praia do Guincho consiste na referência aos futuros levantamentos a serem realizados, onde as comparações entre diversos modelos a serem obtidos e o modelo de referência revelarão as alterações ocorridas entre os intervalos de tempo adotados, as quais poderão ser correlacionadas com a atuação das forças morfodinâmicas durante os intervalos. Dessa forma, é importante o conhecimento da atuação das forças meteorológicas entre as épocas dos levantamentos (por exemplo, parâmetros fisiográficos costeiros) para que as variações sedimentares ocorrentes possam ser correlacionadas a elas, permitindo análises dos efeitos das forças sobre cada praia monitorada. As variações sedimentares observadas entre a condição de referência e as épocas dos levantamentos traduzem, portanto, os impactos da atuação das forças entre tais épocas.

No longo prazo, as variações sedimentares mensuradas poderão representar ainda os efeitos das futuras alterações climáticas sobre o sistema costeiro. Entre as alterações destacam-se elevação do nível médio do mar, variação do regime de agitação marítima, diminuição da precipitação e aumento da temperatura, apontadas como as prováveis responsáveis por alterações futuras na morfologia das praias do Concelho de Cascais.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada com recursos de projetos de pesquisa da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste no Monitoramento de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05 – PETROMAR, CTPETRO – FINEP / PETROBRAS / CNPq): Subprojetos Cooperativos HIDROSEMA, MOLECO e CRONALOG. As atividades foram desenvolvidas com o apoio logístico do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEOPRO/DG/UFRN), do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP/UFRN) e do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN). Os autores agradecem especialmente à Prof^a. Dr^a. Conceição Juana Fortes e ao Prof. Dr. João Alfredo Santos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal.

Referências Bibliográficas

- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. **Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil**. *Marine Geodesy* 38(1): 1-25, 2015. **DOI:**10.1080/01490419.2014.904257
- AMARO, V. E.; SANTOS, M.S.T; SOUTO, M. V. S. **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de precisão** (ISBN: 9888591374601). Natal: Editora do Autor, 2012.
- ANTUNES, C. E TABORDA, R. Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creet, v.56, n.1, p. 218-222, 2009.
- 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**, Coconut Creet, v.24, n.6, p.1516-1528, 2008.
- EPN (EUREF PERMANENT NETWORK). 2012. **Informações obtidas da página do EPN na internet**. EPN. Disponível em: <<http://www.epncb.oma.be>> Acesso em: 01 abril 2012.
- FEATHERSTONE, W.E.; DENTITH, M.C. & KIRBY, J.F. Strategies for the accurated determination of orthometric heights from GPS. **Survey Review**, Bristol, v.34, p.278-295, 1998.
- GEMAE, CAMIL. 1984. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1984.
- IGP (Instituto Geográfico Português). 2012. **Informações obtidas da página do IGP na internet**. IGP. Disponível em: <<http://www.igeo.pt/Frameset-oinstituto.htm>>. Acesso em: 01 abril 2012.
- MARTINS, G.A. **Estatística Geral e Aplicada**. São Paulo: Editora Atlas, 2006.
- MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003
- MATOS, A.C.O.C. **Implementação de MDT digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. 2005. 335 f. 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.

- 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**, Curitiba, v.15, p.469-483, 2009.
- MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2007.
- MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: GUERRA, A. J. T. CUNHA, S. B. (Orgs). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A., p. 253-308, 4ª edição, 2001.
- RAHMSTORF, S. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. **Science**, v.315, p. 368-70, 2007.
- RAMALHO, M., REY, J., ZBYSZEWSKI, G., MATOS ALVES, C., PALÁCIOS, T., MOITINHO DE ALMEIDA, F., COSTA, C. E KULLBERG, M. **Notícia Explicativa da Folha 34-C (Cascais) da Carta Geológica de Portugal**. Departamento de Geologia, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 104 p., 2001.
- TABORDA, R.; ANDRADE, C.; MARQUES, F.; FREITAS, M. C.; RODRIGUES, R.; ANTUNES, C.; PÓLVORA, C. **Plano estratégico de Cascais face às alterações climáticas: sector zonas costeiras**. Lisboa, Portugal, 2010.
- TABORDA, R. & DIAS, J. Análise da sobre-elevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/ Março de 1978 e Dezembro de 1981. **Geonovas 1, A Geologia e o Ambiente**, Lisboa, n. especial 1, p. 89-97, 1992.
- SANTOS, M.S.T. & AMARO, V.E. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreiras no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 14, n. 2, p.151-162, 2013.
- 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**, Curitiba, 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**, Rio de Janeiro, v. 63, n.5, p.663-681, 2011.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications**. N. York: Walter de Gruyter, 1993.
- 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.