



Aplicação de técnicas de posicionamento GPS tridimensional para localizar linhas de costa: estudo de caso na praia de Boa Viagem, Recife/PE, Brasil. *

Application of a three-dimensional GPS positioning technique to locate shoreline: a study case at Boa Viagem Beach, Recife/PE, Brazil.

César P. Rocha ^{1,2}, Tereza Cristina M. Araújo ²; Francisco Jaime B. Mendonça ³

RESUMO

A capacidade de regeneração natural das praias é afetada pela conjugação de fenômenos naturais e atividades antrópicas. Entretanto, em virtude do crescimento populacional e sua demanda preferencial pelas faixas litorâneas, as atividades antrópicas passaram a exigir cuidados específicos para evitar tragédias e minimizar o impacto das interferências humanas nos ambientes costeiros. O objetivo deste estudo foi testar uma nova metodologia de localização de linhas de costa através de técnicas de posicionamento tridimensional pelo GPS (Global Positioning System), em que suas alturas são reduzidas ao referencial de nível da maré local. Para isso foi necessário correlacionar os referenciais verticais, através de um artifício apropriado que envolveu a coleta de dados GPS na linha d'água e o traçado da curva de maré. Esse método foi aplicado na praia de Boa Viagem, Recife/PE, na costa Nordeste do Brasil e propiciou a obtenção do Modelo de Elevação Digital, com base em centenas de pontos coordenados, oriundos do deslocamento da antena móvel do GPS em ziguezague, sobre o protótipo de um veículo apropriado para tal finalidade. O indicador escolhido para representar a linha de costa foi à linha de nível de altura equivalente à linha de espraiamento das ondas, ou seja, a curva de nível de altura igual à máxima elevação da linha d'água observada em uma série temporal, acrescida do runup das ondas local. O produto final apresenta o modelo de elevação digital georreferenciado da área pesquisada onde são mostradas algumas curvas de nível que compõem o relevo da área de estudo, entre as quais se destaca a curva de altura correspondente à linha de costa. No futuro, a comparação entre os produtos gerados em épocas distintas poderá servir para monitorar linhas de costa, em qualquer parte do mundo.

1 Autor correspondente - rochacp@gmail.com

2 Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária – Recife/PE, CEP 50670-901, Brasil

3 Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária – Recife/PE, CEP 50670-901, Brasil

ABSTRACT

The capacity of natural regenerations of beaches is affected by a conjunction of natural phenomena and men-induced activities. However, because of the population growth and its demand for shore bands, the human activities started to demand specific measures in order to avoid tragedies and minimize the impact of the human interference in coastal environments. The objective of the present study was to test a new method of locating shoreline through techniques of the GPS (Global Positioning System) three dimensional positioning, in which the heights were reduced to the referential of the local tide level. In order to achieve this goal it was necessary to correlate the vertical referential using an appropriate artifact which involved a collection of GPS data of the water lines and tracing of the tide curve of the same day. This measure was necessary order to obtain the heights of the same point in two vertical referential: the tidal and ellipsoid. The difference between these measurements originates a constant reduction applied to all GPS heights, reducing them to the tidal referential. Nonetheless, it should be observed that despite the reduced tidal referential, such heights are still tied to the referential of the NAVSTAR System, and they can be monitored at any time in to detect eventual dislocations of the reference point. The use of such method enabled the creation of a Digital Elevation Model of the Boa Viagem Beach in the city of Recife, Pernambuco State in the northeastern coast of Brazil, over which it is possible to simulate the natural dislocation of the water line during the tide movements, until it reaches the shoreline height. This model was generated based in hundreds of coordinated points originated from the zigzag dislocation of the mobile GPS antenna using a vehicle prototype appropriate to this need. The indicator chosen to represent the shoreline was the line of height level equivalent to the beach line of the waves, which means, the curve level of a height equal to the maximum elevation of the water line observed in a temporal series, adding the runup of the local waves. The final product presents a geo referenced digital elevation model of the study area in which some level curves that compose the landscape are shown, highlighting the height curve corresponding to the shoreline. This method is also used to visualize the water line position during any tidal elevation stage. In the future, the comparison between the results generated in distinct times will enable the monitor of shoreline in any part of the world.

1. INTRODUÇÃO

A linha de costa é uma das feições geomorfológicas mais dinâmicas do nosso planeta. Sua determinação e monitoramento são indispensáveis para a conservação do ambiente costeiro, nos quais as erosões, usualmente, resultam da combinação de fatores naturais, tais como as tempestades, as correntes marinhas e a geomorfologia da praia e de fatores induzidos pelo homem, como as explorações costeiras e as atividades de engenharia (Esteves et al., 2003). Em virtude dessa dinâmica e da existência de múltiplos indicadores de linha de costa, comparar os resultados de pesquisas, ainda que referentes à mesma região, muitas vezes não é uma tarefa das mais fáceis. A diversidade de indicadores de linha de costa constitui-se em um dos fatores que mais contribuem para isso, conforme pode ser observada nos estudos efetuados por Moore et al., (2006); Morton e Speck (1998); Pajak e Leatherman (2002); Parker (2003); Zhang et al. (2002), os quais usaram ou citaram indicadores como crista de praia, linha do runup das ondas, linha d'água média e linha d'água alta.

Alguns indicadores de linha d'água têm aplicação específica, como as linhas d'água médias altas e baixas, que em alguns países, são usados como base das cartas

náuticas, enquanto outros indicadores são sazonais e/ou descontínuos, variando de acordo com a geomorfologia da praia, como acontece com a linha do runup e as cristas de praia. Para gerenciar o espaço costeiro, é necessário conhecer a tendência histórica da elevação do nível do mar e/ou as acomodações tectônicas, além das alterações geomorfológicas causadas pelo transporte de sedimentos e/ou pelas interferências humanas. De uma maneira geral, a delimitação desse espaço baseia-se na linha de costa. Por isso, há mais de três décadas discute-se a necessidade de padronizar os procedimentos das pesquisas nessa área do conhecimento, para melhorar a consistência dos resultados. Leatherman (2003).

A linha de costa brasileira foi estabelecida pelo Decreto-Lei n° 9760 de 05 de Setembro de 1946 (Diário Oficial da União, 1946), com base na linha média de preamares de 1831. Esta lei instituiu a cobrança de impostos sobre uma faixa continental de 33m medidos a partir da linha de costa. Em Fevereiro de 1998, foi promulgada outra Lei federal sob n° 9636 (Serviço Público da União, 2005), a qual estabeleceu a obrigatoriedade de compra dessas terras, para os proprietários que não comprovassem ter a sua posse à mais de 01 ano. Esta lei vem sendo

veementemente protestada, por conta das inconsistências causadas pelo indicador de linha de costa estabelecido pelo Decreto-Lei 9760, que não foi materializado ao longo do litoral. A posição ocupada pela linha de costa à época do decreto que instituiu seu indicador tem sido alvo de pesquisas, como por exemplo, o estudo sobre regressão histórica da linha de costa Lima (2002). Entretanto, em virtude da sua dinâmica, a posição geográfica da linha de costa em 1831, em muitos lugares, já não corresponde mais a real confrontação do mar com o continente.

A finalidade desse estudo foi testar a aplicabilidade de uma nova metodologia para localizar linhas de costa, através de técnicas de posicionamento tridimensional GPS, com base em um indicador com posicionamento geográfico inequívoco, fundamentado na máxima HWL (High Water Line) de uma série temporal, acrescida do runup das ondas. Esse é um indicador espacial de caracterização numérica inequívoca e que pode ser associado a uma condição de maré do passado ou do futuro.

2. TEORIA BÁSICA

De acordo com Sugguio et al. (1985) e Webster (1988) a linha de costa representa o limite entre o mar e o continente, no alcance máximo das ondas, onde cessa a efetiva ação marinha. Entretanto, em virtude da influência direta das ondas e marés, alguns refinamentos foram-lhe agregados. Atualmente, a linha de costa é definida por um conceito mais específico que correlaciona o confronto da massa d'água com o continente em um determinado estágio de maré e leva em conta o adicional de altura das ondas que atingem a praia (Graham et al., 2003; Moore et al., 2006; Pajak e Leatherman, 2002; Parker, 2003; Ruggiero et al., 2003). Portanto, o regime de ondas é um dos fatores de maior influência sobre uma linha de costa.

As ondas são classificadas como progressivas, mergulhantes ou descendentes de acordo com a forma de arrebentação. Essa performance é fortemente influenciado pela geomorfologia da praia e se constitui em um dos fatores de maior contribuição sobre a dinâmica da linha de costa, devido ao continuado exercício de transporte de sedimentos (Muehe, 1996; Hoefel, 1998; Ross, 2007). Além disso, o runup das ondas contribui diretamente na sobre-elevação da

linha d'água, uma vez que ele significa a altura alcançada pela onda após chocar-se contra a praia, sendo medida em relação ao nível estático do Mar (Moore et al. 2006; Nielson e Hanslow, 1991; Ruggiero et al., 2001). A figura 1 ilustra a definição.

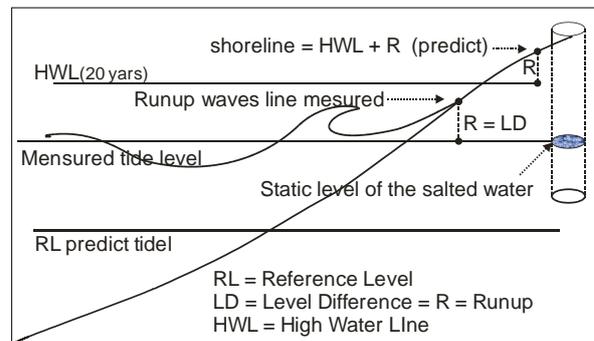


Figura 1. Ilustração do runup das ondas e esquema de medições. Fonte: Adaptado de Moore et al. (2006).
Figure 1. Sketch of the wave runup and a scheme for its measurement. Source: adapted from Moore et al. (2006).

Todos os processos que envolvem o confronto do mar com o continente são essencialmente dinâmicos. Por isso a posição geográfica de uma linha de costa também é essencialmente dinâmica. Além disso, de acordo com Rocha et al. (no prelo), a crosta terrestre é suscetível de acomodações de natureza tectônica e/ou subsidências que nem sempre são perceptíveis quando as observações são referidas aos sistemas locais, que podem estar se deslocando juntamente com a região observada. Em geral as acomodações de curto período são de pequena grandeza, entretanto, deve-se estar atento para possíveis acomodações localizadas e as manifestações vulcânicas. Segundo Martim, et al. (1985), o monitoramento dessas acomodações requer o uso de um sistema com ancoragem externa como, por exemplo, o GPS (Global Positioning System), o qual Rocha (2000); Romão (1982); Segantine (2002); Schofield (1993); Torge (2001); Vanicek e Krakiwiski (1986), entre outros, testaram e aprovaram a capacidade em gerar posições geográficas de alta precisão. Entretanto, os posicionamentos produzidos pelo GPS não são referidos ao nível médio dos mares (geóide) e sim a uma superfície específica, gerada

através de modelagem matemática, denominada elipsóide de referência, cujos parâmetros constituem o datum de referência das observações (Segantine, 2002).

De acordo com Rocha (2000); Schofield (1993); Torge (2001); Vanicek e Krakiwski (1986), os data elipsoidais são modelos matemáticos gerados a partir da rotação de elipses com diferentes parâmetros, cujos dimensionamentos visam obter o máximo ajuste entre a superfície modelada e a superfície física das regiões da Terra a que se propõe representar.

Portanto, ao expressar as coordenadas de um ponto qualquer, é preciso informar o modelo ao qual se referem.

O datum geoidal, ao qual o datum tidal está associado, é um modelo baseado no campo equipotencial da terra e apresenta inconsistências inerentes à sua modelagem. A correlação entre os data elipsoidais e o datum geoidal depende do conhecimento da ondulação geoidal do lugar e varia de acordo com os parâmetros do elipsóide (Veronez, 1998).

3. METODOLOGIA APLICADA

Esse experimento foi realizado na praia de Boa Viagem, situada no litoral sul da cidade de Recife/PE, do Nordeste brasileiro. O perfil geológico dessa praia é constituído de terrenos do quaternário recente com depósitos fluviais, beach rocks ou arenitos de praia e recifes de coral; terraços holocênicos com fragmentos de conchas; e, terraços pleistocênicos, (Gregório, 2004). De acordo com Araújo et al (2007), a densa ocupação dessa praia foi facilitada pela legislação local, a qual permitiu a construção de edifícios residenciais e da rede hoteleira com mais de vinte pavimentos, com graves repercussões na exploração do terraço marinho. Segundo Silva et al. (2006), a densidade recreacional dessa praia já era inferior a 2,9 m²/pessoa nos horários de pico. Essa elevada densidade ocupacional implica na destruição de ambientes reprodutivos e muitas vezes na descaracterização dos indicadores físicos da linha de costa.

O uso da metodologia testada neste estudo dispensa os indicadores com características físicas aparentes, pois se baseia apenas na altura da linha d'água. Entretanto, a sua aplicação requer: obter a

altura GPS na linha d'água e a altura da maré no instante da coleta dos dados GPS; conhecer a máxima elevação da HWL em uma série histórica de 20 anos; estimar o runup das ondas na praia pesquisada; e, obter os perfis de praia, que servirão de base para gerar o DEM da praia.

Os pontos coordenados que compõem os perfis do seguimento da praia pesquisada foram gerados em pós-processamento dos dados GPS, usando técnica de posicionamento relativo à estação SAT 93110 que representa um dos vértices da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), distante cerca de 8 km da área de estudo. A Linha de base relativamente curta facilitou a fixação da ambigüidade da fase da portadora, usando algoritmo do tipo OTF (On The Fly).

O ponto inicial na linha d'água foi gerado com técnica de posicionamento estático rápido e os pontos dos perfis de praia foram obtidos com técnica de posicionamento relativo dinâmico, ambos com taxa de gravação de 2s, para garantir a obtenção de pelo menos um ponto coordenado por metro linear de perfil, em função da velocidade do deslocamento (caminhada).

Durante a coleta dos dados na área de estudos, o receptor GPS foi brevemente estacionado na linha d'água (método estático rápido), em lugar sem ondas, e, em seguida, transportado sobre toda a área de estudo em ziguezague, no intervalo [linha d'água; linha do runup], ultrapassando-se um pouco o limite superior, para garantir que cada perfil contemple um ponto da linha de costa. A densidade de pontos (N_p ; E_p ; h_p) na área de estudo, pode ser alterada de acordo com o interesse do pesquisador em obter curvas com mais detalhamento e precisão. Figura 2.

O transporte da antena do receptor GPS foi efetuado por um veículo dotado de um sistema de fixação tri-articulado para estabilizar a verticalidade da antena, mantendo-a equidistante ao solo. Como o método prevê a redução das alturas para o referencial de maré, a altura das antenas em relação ao solo será irrelevante, entretanto, precisa ser mantida constante do começo ao fim de uma seção de trabalho.

As operações de laboratório consistiram em gerar a curva de maré referente ao mesmo dia da coleta dos dados de campo, com base nos picos da maré informados pela DHN (Diretoria de Hidrografia e

Navegação) da Marinha do Brasil; pesquisar qual a máxima elevação da maré local na série temporal selecionada, que neste estudo foi de 20 anos; processar os dados do GPS; reduzir as alturas geradas pelo GPS para o nível de redução das marés, com base na diferença de altura entre os referenciais tidal e elipsoidal; e, gerar o DEM (Digital Electronic Model) da área de estudo, usando um software de interpolação de curvas.

Praia de B. Viagem: Pontos GPS

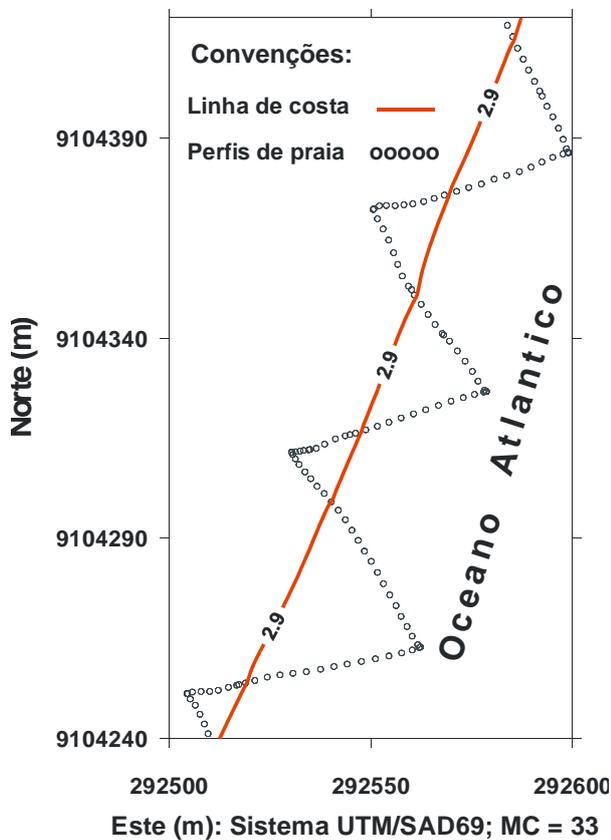


Figura 2. A arquitetura de deslocamento da antena GPS, mostra a distribuição e densidade dos pontos. A linha de costa da cota 2,9 m indica a posição geográfica da linha de costa.

Figure 2. The architecture of the GPS antenna dislocation, it shows the density and distribution of the points. The coast line quota of 2.9 m shows the geographical position of the coast line.

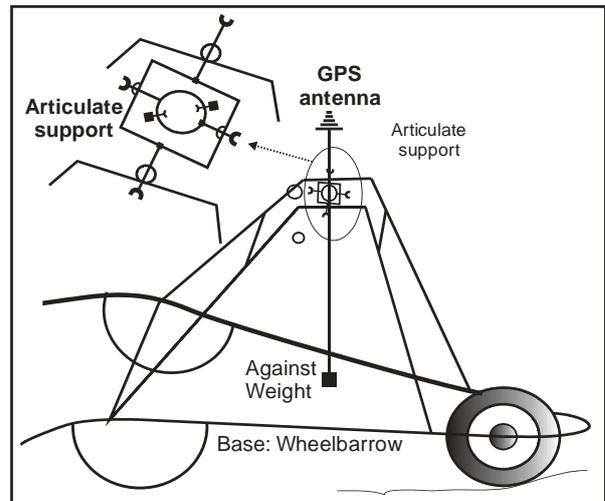


Figura 3. Veículo transportador da antena GPS. O sistema de fixação tri articulado, estabiliza a verticalidade da antena e a mantém equidistante do solo.

Figure 3. Vehide that transports the GPS antenna. The fixating system with three articulations keeps the antenna verticality and its equidistance from the soil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A altura de maré no instante do start GPS foi identificada na curva de maré corrigida, ou seja, isentas dos erros provenientes das influências meteorológicas e astronômicas, conforme cita Vargas et al. (2008). Figura 4.

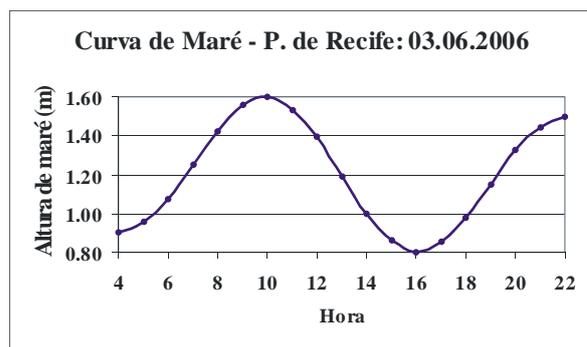


Figura 4. Curva de maré do dia 03 de Junho de 2006, onde se pode observar a altura da linha d'água no instante da coleta dos GPS sobre a linha d'água.

Figure 4. Tide Curve from June 6th 2006, where it is possible to observe the height of the water line at the instant of the GPS data collection of water lines.

Da mesma forma, a máxima elevação da HWL dos últimos 20 anos, foi pesquisada nas tábuas de marés pós-publicadas pela DHN, relativas ao marégrafo do porto da cidade de Recife/PE, onde constam elevações máximas de 2,6 m, no período 1987/2006. Portanto, a linha de costa definida para este estudo, consistiu dessa altura de maré, acrescida do runup, o qual foi estipulado em 0,30 m com base nos valores medidos em outras praias da região (Rocha et al., no prelo). Assim, a linha de costa deste estudo está representada pela curva de nível de cota 2,9 m acima do referencial de altura das marés da estação maregráfica do porto da cidade de Recife.

No que diz respeito às coordenadas do GPS, estas, apesar de precisas, estão referidas ao datum SAD 69, embora, expressas no formato do Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM). De acordo com Moore et al., (2006), a correlação entre os dados verticais é uma das principais fontes de erros nas localizações das linhas de costa. Neste caso, as alturas GPS, associadas que são à superfície elipsoidal, não foram comparadas diretamente com as altitudes ortométricas (geóide), ao qual os referenciais de maré estão associados, porque pertencem a sistemas altimétricos diferentes (Torge, 2001). Normalmente, a correlação entre esses referenciais é feita com base nas medidas de afastamento informadas nos mapas geoidais. Entretanto, de acordo com Veronez (1998) o mapa geoidal do Brasil apresenta erros da ordem de 4 m à 6m.

Para contornar o problema da correlação das alturas GPS com o referencial das marés, obteve-se a altura GPS na linha d'água e observou-se a altura dessa linha na curva de maré, ou seja, obteve-se a distância vertical de um mesmo ponto em relação aos dois referenciais verticais: o tidal e o elipsoidal. A diferença entre essas grandezas (k) foi subtraída das alturas de todos os pontos que compõem os perfis GPS para reduzi-las ao referencial de nível das marés, transformando os pontos coordenados UTM, (N_i ; E_i ; h_i), gerados pelo deslocamento do receptor GPS sobre a praia, em (N_i ; E_i ; h_i'), onde h_i' representam as alturas GPS reduzidas ao referencial de nível das marés. Figura 5.

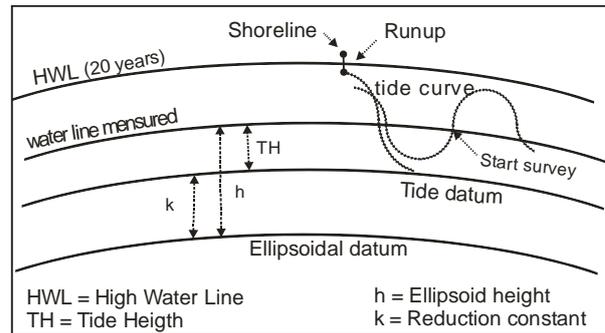


Figura 5. Esquema de redução das alturas GPS para o nível do mar.

Figure 5. Scheme of the GPS height reductions to the sea level.

A figura 6 mostra as curvas de nível no DEM da praia de Boa Viagem, elaborado a partir das coordenadas tridimensionais dos pontos que compõem os perfis da área de estudo, nas quais as alturas já estão reduzidas ao referencial de nível da maré, com base no esquema de redução mostrado na figura 5. Neste modelo, a curva de cota equivalente à altura da linha de costa encontra-se realçada e de acordo com as necessidades da pesquisa, outras curvas podem ser interpoladas ou suprimidas.

Conforme se pode observar nesse DEM, o afastamento entre as curvas de nível varia com a declividade da face de praia, denunciando que as elevações de nível do mar acarretam diferentes deslocamentos horizontais da linha d'água e que a grandeza desses deslocamentos serão mais significativas nas planícies baixas, brejos e mangues.

As principais fontes de erros que afetam a metodologia aplicada neste trabalho dizem respeito aos posicionamentos pelo GPS, as interpolações das curvas de nível pelo software topográfico, as alturas das marés, ao transporte da antena GPS e a correlação entre os referenciais verticais.

De acordo com Hofmann-Wellenhof et al. (1998), os posicionamentos gerados pelo GPS no modo relativo dinâmico, resultam aproximações da ordem de $0,01 \text{ m} + 2 \text{ ppm}$ (variável com o comprimento da linha base). Entretanto, o fator variável será praticamente suprimido, caso venha a ser construído um marco de concreto na área do experimento, conforme fez Rocha et al. (no prelo). Nesse caso, as

coordenadas do marco da praia poderão ser estabelecidas com técnicas de posicionamento estático relativo, com precisão de poucos milímetros.

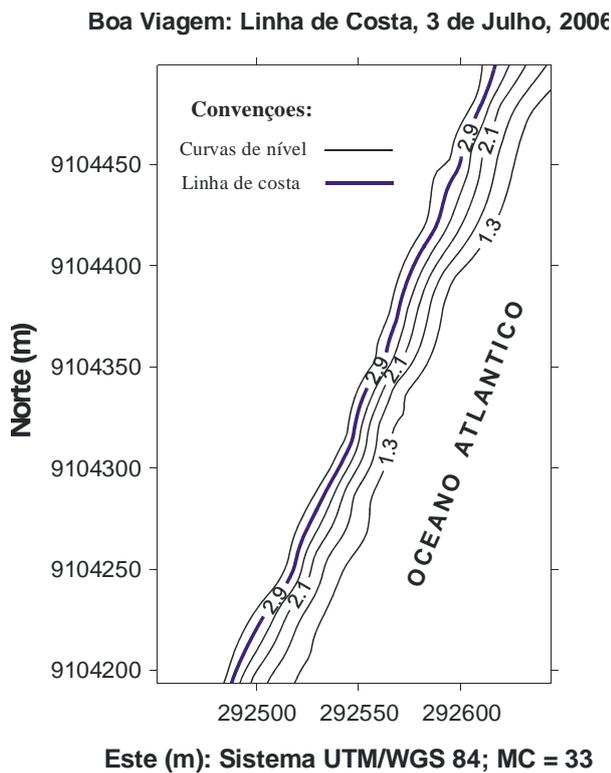


Figura 6. Modelo digital da área de praia pesquisada, onde se destaca a curva de nível de cota 2,9m acima do referencial de nível das marés, que representa a linha de costa deste estudo.

Figure 6. Digital Elevation Model of the Boa Viagem Beach, in which the level curve quota of 2.9 m represents the coast line. New curves could be either inserted or suppressed according to the research needs.

A qualidade das curvas interpoladas foi conferida visualmente e pela comparação da grelha de resíduos dos métodos: Minimum Curvature Spline - MCS (Smith & Wessel, 1990), Kriging- Krig (Cressie, 1990) e Natural Neighbor - NaN (Sibson, 1981). Os menores RMSE (Root Mean Square Error) foram observados no método Kriging e NaN, cujos resíduos na malha observada,

foram da ordem de 0,06 m. Dois pontos da linha de costa foram tomados para controle, verificando-se sua posição geográfica no mapa de distribuição dos pontos gerados pelo GPS (figura 2) e locando-os no DEM. Esse controle consistiu em verificar a proximidade desses pontos em relação à curva de nível de mesma altura no DEM e resultaram em 23 cm e 27 cm, respectivamente. Entretanto, é possível que esse erro seja menor, pois como a cadencia de registro dos pontos GPS, apesar de elevada, não é contínua, as coordenadas exatas dos pontos de controle foram obtidas por interpolação.

A avaliação visual consistiu em observar a ocorrência de quebra na natural suavidade de traçado das curvas de nível, considerando que cada um dos perfis de praia contém um ponto da linha de costa com espaçamento da ordem de 20 m ou menor, seguindo esta direção. Desvios significativos na posição de quaisquer dos pontos gerados pelo método de interpolação das curvas, serão denunciados pela quebra de suavidade das linhas de nível do modelo.

A informação referente à altura de maré pode conter erro, devido a considerável influência das alterações climáticas no comportamento das marés, bem como das interferências localizadas, como por exemplo, a proximidade da desembocadura de um rio. Para minimizar esses erros é aconselhável consultar o registro a posteriori, ou seja, a maré que de fato aconteceu. A diferença de intensidade e horário entre a maré registrada na estação maregráfica e o local do experimento pode ser estimada com base na diferença entre as alturas informadas por duas estações maregráficas, entre as quais esteja inserido o local da pesquisa. É relevante considerar que três centímetros de equívoco na altura de maré, como é passivo de acontecer, causa um deslocamento horizontal de 25 cm na linha d'água em praias com 12% de rampa, como é o caso do setor da praia pesquisada, embora nas proximidades da linha de costa, comumente essa rampa seja mais acentuada, o que reduz esse deslocamento. Portanto, nos estudos que necessite localizar linhas de costa com precisão melhor que 25 cm faz-se necessário verificar a altura GPS do nível d'água, na estação maregráfica de referência e no local do experimento, concomitantemente, para minimizar os erros devido a equívocos na medida da altura da maré.

Os erros provenientes do transporte da antena são de natureza sistemática, devido à medida da altura e a falta de verticalidade da antena móvel. Neste trabalho, esses erros foram praticamente eliminados pelo uso de um veículo dotado de um dispositivo de fixação tri-articulado, que mantém a verticalidade da antena durante seu deslocamento. Como essa metodologia dispensa quaisquer medidas de altura da antena, pois as alturas de todos os pontos serão posteriormente reduzidas ao referencial de nível da maré, basta que a altura da antena em relação ao solo seja mantida constante. Portanto, deve-se manter o mesmo operador do início ao fim de uma seção de trabalho.

De acordo com Rocha et al., (no prelo), ao reduzir as alturas GPS para o referencial de nível das marés, ocorrem erros de posicionamento em virtude da diferença entre os raios de curvatura dos referenciais verticais e, eventual não paralelismo entre a curvatura do elipsóide e a curvatura da linha d'água. Os erros oriundos da diferença entre os raios de curvatura dos Vdata afetam as medidas horizontais (Silva et al., 2002). Entretanto, a redução de nível entre os data verticais, que no caso é da ordem de 27 m, provoca erros inferiores ao milímetro nas medidas horizontais da ordem de 200 m, como é o caso dessa área de estudo. Equação 1.

$$6.378.137,00 \text{ m} \geq R_{0_{WGSS_4}} \leq 6.356.752,31 \text{ m}$$

$$\frac{D'}{R_0} = \frac{D}{R_0 + H} \quad (\text{Silva et al., 2002})$$

Onde:

- D e D' - medidas dos arcos nos dois níveis de elevação.
- R₀ - raio médio de curvatura da terra.
- H - afastamento entre as duas superfícies.

Os erros provenientes da inclinação entre os Vdata afetam a posição vertical dos pontos cotados e foram estimados com base no afastamento entre a superfície do elipsóide e da linha d'água em Japaratinga/AL e Boa Viagem/Recife/PE, distantes cerca de 155 km, onde foram observados afastamentos de 20,5 m e 27,5 m, respectivamente, indicando que a inclinação

entre os Vdata nessa região é da ordem de 0,004%. Este valor confirma uma tendência de afastamento já observada por Rocha et al., (no prelo), no seguimento de praia Maceió/Recife (Figura 7).

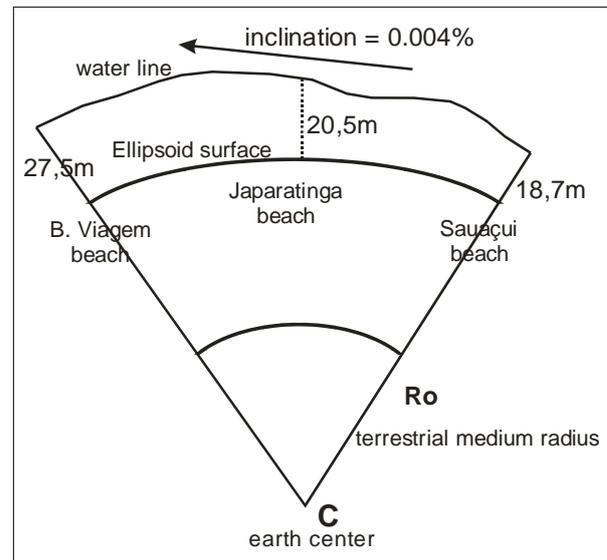


Figura 7. Vdata com diferentes raios de curvatura e eventual inclinação entre a curvatura do elipsóide e a curvatura da linha d'água, que podem acarretar erros nas medidas horizontais e verticais.

Figure 7. Vertical data with different curvature rays and eventual inclinations among both elipsoid and water line curvatures, which can cause errors in horizontal and vertical measurements.

Inclinações nessa ordem de grandeza causam erros máximos de 10 mm na posição vertical dos pontos, já que o experimento se limitou a uma parte de praia com 200 m de extensão. Para evitar a propagação dos erros dessa natureza, basta verificar a medida das alturas GPS na linha d'água em espaçamentos pré-determinados e recalcular a constante de redução, relativa à nova altura de maré.

O desenvolvimento dos trabalhos de campo foi efetuado em cerca de 10 minutos. Isto significa um rendimento em torno de 1km/h. Esse rendimento pode ser aumentado consideravelmente com a utilização de um veículo motorizado, como o que foi utilizado por Baptista et al. (2008), observada a relação custo-benefício.

5. CONCLUSÕES

A linha de costa utilizada nessa pesquisa é caracterizada por uma definição matemática inequívoca, associada ao referencial de nível das marés e isenta dos enganos provenientes das interpretações pessoais, como é suscetível de acontecer com as interpretações de imagens. Essa definição atribui à linha de costa um endereço espacial importante, já que o movimento da linha d'água não prescinde da escala vertical.

A técnica de redução das alturas GPS para o referencial de nível das marés, usada nesse estudo, contorna uma das grandes fontes de erros nas determinações de linha de costa, já que o modelo digital do terreno gerado com base no banco de dados GPS representa a superfície real sobre a qual as marés se movimentam livremente, com distorções toleráveis. Esse formato possibilita observar os movimentos da linha d'água, mediante alterações do nível do mar ou alterações de relevo e demonstra claramente que a linha de costa não pode estar dissociada do espaço tridimensional, sendo esta uma condição imprescindível para correlacionar a escalada vertical do nível do mar com o deslocamento horizontal da linha de costa.

O protótipo do veículo criado para transportar a antena GPS ao longo da praia, estabiliza a antena na posição vertical e fixa sua altura em relação ao solo, eliminando os erros sistemáticos de verticalidade e medida da altura da antena, além de melhorar o nível de conforto do operador.

O deslocamento da antena do receptor GPS deve ir um pouco além do intervalo [linha do runup; linha d'água], para melhorar a confiabilidade das curvas próximas ao limite desse intervalo e ampliar a possibilidade de identificar novas posições da linha de costa no caso de eventuais elevações do nível do mar. Por outro lado, o rendimento do processo poderá ser muito maior se o intervalo do limite dos perfis forem mínimos. Entretanto, isto só será possível se o interesse maior do estudo se limitar à localização da linha de costa.

A propagação do erro devido ao não paralelismo entre as superfícies do mar e do elipsóide, pode ser evitada, efetuando-se medições com espaçamento regulares da altura GPS na linha d'água. De qualquer forma, qualquer que seja a técnica usada para

determinar linhas de costa, esse cuidado é necessário, pois as elevações de maré não ocorrem concomitantemente em todos os pontos em torno da Terra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE pela gentileza de ceder o receptor GPS usado nesse estudo, a CAPES pela concessão de uma bolsa de estudos (primeiro autor) e a Universidade Federal de Alagoas, pelo incentivo à capacitação do docente a ela vinculado (primeiro autor).

BIBLIOGRAFIA

- Araújo, M.C.B., Souza, S.T., Chagas, A.C.O., Barbosa, S.C.T. & Costa, M.F. (2007) - Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*. 7(2): 97-104.
- Baptista, P., Bastos, L., Cunha, T., Bernardes, C. & Dias, J.A. (2008) - Aplicações de metodologias de monitorização GPS em litorais arenosos. Geração de modelos de elevação do terreno. *Revista de Gestão Integrada*. 8 (1): 9-23.
- Cressie, N.A.C. (1990) - The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22(3):239-252. (doi: 10.1007/BF00889887)
- Diário Oficial da União (1946) - Decreto-Lei nº 9760 de 06.09.1946, Rio de Janeiro, DF, 1946.
- Esteves, L. S., Silva, A. R. P., Arejano, T. B., Pivel, M. A. G. & Vrajane, M. P. (2003) - Coastal Development and human impacts along the Rio Grande do Sul beaches, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI35:548-556
- Graham, D., Sault, M. & Bailey, J. (2003) - National Ocean Service Shoreline – Past, Present, and Future. *Journal of Coastal Research*, 38:14-32.
- Gregório, M.D.N. (2004) - Sedimentologia e morfologia das praias do Pina e da Boa Viagem, Recife (PE) – Brasil. Dissertação de mestrado. 92p., Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.
- Hoefel, F. G. (1998) - Morfodinâmica de praias arenosas: uma revisão bibliográfica. Editora da Univali, 92p., Brazil. (ISBN : 8586447080)
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenberger, H. & Collins, J. (1998) - *Global Positioning System – Theory and*

- Practice. 4th ed., Springer-Verlag. (ISBN: 3-211-82839)
- Leatherman, S. P. (2003) - Shoreline change mapping and management along the U.S. East coast. *Journal of Coastal Research*, 38:5-13.
- Lima, O. P. de (2002) - Localização Geodésica da Linha de Preamar Média de 1831-LPM/1831, com vistas à demarcação dos terrenos de marinha e seus acréscidos. UFSC, Santa Catarina/RS/Brazil. Dissertação de Doutorado, 249p.
- Martim, L., Flexor, J. M., Blitzkow, D. & Suguio, K. (1985) - Geoid Change Indications Along Brazilian Coast During the Last 7000 Years. *Proceedings of the Fifth International Coral Congress, Tahiti*. V. 3. p. 85-90.
- Moore, L.J., Ruggiero, P. & List, J.H. (2006) - Comparing Mean High Water and High Water Line shorelines: Proxy Datum Offsets be Incorporate into shoreline Change Analyses. *Journal of Coastal Research*, 22(4):894-905. (doi: 10.2112/04-0401.1)
- Morton & Speed (1998) - Evaluation of shoreline and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 14:1373-1384.
- Muehe, D. (1996) - Geomorfologia costeira. In: Cunha S.B. da e Guerra A. J. T. (Eds.), *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro/RJ/Brazil, pp 191-238. (ISBN: 8528605485)
- Nielson, P. & Hanslow, D.J. (1991) - Wave Runup Distributions on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research*, 7:1139-1152.
- Pajak, M. J., & Leatherman, S. P. (2002) - The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, 18:329-337.
- Parker, B. B. (2003) - The Difficulties in Measuring a Consistently Defined Shoreline – The Problem of Vertical Referencing. *Journal of Coastal Research*, 38:44-56.
- Rocha, C.P. (2000) - Determinação e Análise de Azimutes por Astronomia Clássica e Pelo Sistema de Posicionamento Global. EESC/USP, São Carlos/SP/Brazil. Dissertação de Mestrado, 212p.
- Rocha, C.P., Araújo, T.C.M., & Mendonça, F.J.B. (no prelo) - Methodology for Shoreline location using the 3D-GPS positioning: a case study at Sauaçui beach, Brazilian Northeast. *Journal of Coastal Research*.
- Romão, V.M.C. (1982) - Método Doppler de Posicionamento por Satélite NNSS. Dissertação de Mestrado, 126p., UFP, Curitiba, Paraná, Brazil.
- Ross, J. L. S. (2007) - Geomorfologia, Ambiente e Planejamento. Ed. Contexto, São Paulo/SP/Brazil. , 1nd edition, 86p. (ISBN: 8585134828)
- Ruggiero, P., Kaminsky, M. G. & Gelfenbaum, G. (2003) - Linking proxy-based and Datum-based shorelines on a high-energy coastline: implications for shoreline change analyses. *Journal of Coastal Research*, 38:57-82.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., Marra, J. J., McDougal, W. G. & Beach, R. A. (2001) - Wave runup, extreme water level and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17(2):407-419.
- Schofield, W. (1993) - *Engineering Surveying, Theory and examination problems for students*. Butterworth – Heinemann, Oxford. 4rd, 554p. (ISBN: 0-7506-0511-1)
- Segantine, P. C. L. (2002) - Sistema de Posicionamento Global - GPS. 2nd edition, 326p., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil ,
- Serviço Público da União - SPU (2005) - Lei federal sob n° 9636. http://www.dji.com.br/leisordinarias/1998-009636/009636_1998_32_a_53.html, (acessada em outubro 2007).
- Sibson, R. (1981) - A brief description of natural neighbour interpolation. In: V. Barnett (ed.), *Interpreting Multivariate Data*, pp. 21–36, JohnWiley. (ISBN 0471280399).
- Silva, I. da, Segantine, P. C. L. & Erwes, H. (2002) - *Introdução a Geomática*. EESC/USP. São Carlos/SP/Brazil , 1nd edition, 99p.
- Silva, J.S. da, Barbosa, S.C.T, Leal, M.M.V., Lins, A.R. & Costa, M.F. da (2006) - Ocupação da praia de Boa Viagem (Recife/PE) ao longo de dois dias de verão: Um estudo preliminar. *Pan American Journal of Aquatic Science*, 1(2):91-98.
- Smith, W.H.F. & Wessel, P. (1990) - Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension. *Geophysics*. 55(3): 293-305. (doi: 10.1190/1.1442837)
- Suguio, K., Martin, L., Bittencourt, A. C. S. P., Dominguez, J. M. L., Flexor, J. M. & Azevedo, A. E. G. (1985) - Flutuações do Nível do Mar Durante

- o Quaternário Superior ao Longo do Litoral Brasileiro e suas Implicações na Sedimentação Costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, 15:272-286.
- Torge, W. (2001) - *Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlim. 3rd edition, 416p. (ISBN 3110170728, 978311017072)
- Vanicek, P. & Krakiwsky, E. J. (1986) - *Geodesy, The Concepts*. Elsevier, Canadá, 2nd edition, 714p. (ISBN: 10-0444877754)
- Vargas, C.I., Oliveira, F.S.B., Oliveira, A.S.B & Charneca, N. (2008) - Análise de Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo). *Revista de Gestão Costeira Integrada*. 8(1): 25-43.
- Veronez, M. R. (1998) - Proposta de Parâmetros de Transformação entre os Sistemas WGS-84 e o SAD-69 para a região de São Carlos. Dissertação de Mestrado, 113p., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Webster (1988) - *The Webster's Ninth New Collegiate Dictionary* Springfield. M.A. Merriam – Webster, 1564p.
- Zhang, K.; Huang, W.; Douglas, B. C. & Leatherman, S. P. (2002) - Shoreline positions variability and long-term trend analysis. *Shore & Beach*, 70(2):31-35.