



Revista Geográfica de América Central
ISSN: 1011-484X
ISSN: 2215-2563
revgeo@una.cr
Universidad Nacional
Costa Rica

Dados Espaciais LIDAR (Light Detection and Ranging) na Caracterização Geomorfológica do Campo de Dunas Costeiras de Rio de Fogo, Rio Grande do Norte - Brasil

Matos-Carneiro¹, Márcia Cristina de Souza; Ferreira², Bruno; Gregorio³, Maria das Neves; Pessanha⁴, Gilberto; Lins da Silva⁵, Dyêgo; Vital⁶, Saulo Roberto de Oliveira

Dados Espaciais LIDAR (Light Detection and Ranging) na Caracterização Geomorfológica do Campo de Dunas Costeiras de Rio de Fogo, Rio Grande do Norte - Brasil

Revista Geográfica de América Central, vol. 2, núm. 61, 2018

Universidad Nacional, Costa Rica

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451755941012>

DOI: <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.12>

Artículo de la Revista Geográfica de América Central de la Universidad Nacional, Costa Rica y está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.



Este trabalho está sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional.

Dados Espaciais LIDAR (Light Detection and Ranging) na Caracterização Geomorfológica do Campo de Dunas Costeiras de Rio de Fogo, Rio Grande do Norte - Brasil

Light Detection and Ranging in the Geomorphological Characterization of the Coast Dunes Field of Rio Do Fogo, Rio Grande Do Norte, Brazil

Datos Espaciales LIDAR en la Caracterización Geomorfológica del Campo de Dunas Costeras del Río de Fogo, Río Grande do Norte - Brasil

Márcia Cristina de Souza Matos-Carneiro¹
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,, Brasil
carmarciaibge@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.12>
Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451755941012>

Bruno Ferreira²
Universidade Federal de Alagoas,, Brasil
brunge2005@gmail.com

Maria das Neves Gregorio³
Instituto Tecnológico de Pernambuco, Brasil
nevesgregorio@hotmail.com

Gilberto Pessanha⁴
Universidade Federal de São Paulo, Brasil
gilberto.unifesp@gmail.com

Dyêgo Lins da Silva⁵
Instituto Tecnológico de Pernambuco, Brasil
dls.pessoal@gmail.com

Saulo Roberto de Oliveira Vital⁶
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
srovital@gmail.com

Recepção: 28 Setembro 2017
Aprovação: 16 Fevereiro 2018

RESUMO:

O objetivo deste estudo foi compreender a dinâmica da evolução geomorfológica do campo de dunas do Rio do Fogo, Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Para tanto, foi elaborado um mapa geomorfológico da área de estudo, cuja base cartográfica (imagens de nuvens de pontos e Modelo Digital do Terreno - MDT) foi originada do mapeamento a laser aerotransportado do sistema LIDAR (Light Detection and Ranging) Airborne. As imagens geradas pelas nuvens de pontos do sensor de varredura a laser possibilitaram caracterizar a geomorfologia do campo dunar, utilizando-se a conservação e / ou dissecação eólicas presentes na área como critério de classificação, identificando das unidades morfoestruturais e suas respectivas morfoesculturas. Tendo como base o grau de conservação morfológica foram identificados dois conjuntos morfológicos bem distintos: (a) uma Planície de Acumulação Eólica Dunar (PAED) e (b) uma Planície de Acumulação Eólica Retrabalhada (PAER). Esses dois conjuntos morfoesculturais eólicos foram elaborados ao longo do Pleistoceno tardio, com atividade deposicional até a transição para o Holoceno.

PALAVRAS-CHAVE: LIDAR, Geomorfologia, Campo de Dunas Rio do Fogo – Brasil.

ABSTRACT:

The objective of this study was to understand the dynamics of the geomorphological evolution of the dune field of Rio do Fogo, State of Rio Grande do Norte, Brazil. For that, a geomorphological map of the study area was elaborated, whose cartographic base (Dot Cloud images and Digital Terrain Model - MDT) originated from the airborne laser mapping of the LIDAR (Light Detection and Ranging) Airborn system. The images generated by the points of the laser scanning sensor were able to characterize the geomorphology of the dune field of the research area, using the wind conservation and / or dissection present in the area as a classification criterion, identifying the morphostructural units and their respective Morphosculptures. Based on the degree of morphological conservation, two very distinct morphological groups were identified: (a) a Dunar Windfall Accumulation Plain; and (b) a Scheduling Windfall Accumulation Plain (PAER). These two morphosculptured Aeolian sets were elaborated along the late Pleistocene, with depositional activity until the transition to the Holocene.

KEYWORDS: LIDAR, Geomorphology, Rio do Fogo Dunes Field – Brazil.

RESUMEN:

El objetivo de este estudio fue comprender la dinámica de la evolución geomorfológica del campo de dunas del Rio do Fogo, Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Para ello, se elaboró un mapa geomorfológico del área de estudio, cuya base cartográfica (imágenes de nubes de puntos y Modelo Digital del Terreno - MDT) fue originada del mapeamiento a láser aerotransportado del sistema LIDAR (Light Detection and Ranging) Airborn. Las imágenes generadas por las nubes de puntos del sensor de barrido láser posibilitar caracterizar la geomorfología del campo dunar, utilizando la conservación y / o disección eólica presentes en el área como criterio de clasificación, identificando de las unidades morfoestructurales y sus respectivas morfoesculturas. (A) una llanura de acumulación eólica Dunar (PAED) y (b) una planicie de acumulación eólica retracada (PAER). Estos dos conjuntos morfoescultura eólicos fueron elaborados a lo largo del Pleistoceno tardío, con actividad depositaria hasta la transición al Holoceno.

PALABRAS CLAVE: LIDAR, Geomorfología, Campo de Dunas Rio do Fogo - Brasil.

INTRODUÇÃO

A zona costeira é um dos espaços naturais mais dinâmicos do Planeta e de grande valor ambiental. Essas regiões desempenham um importante papel socioeconômico como fonte de recursos (Manso et al., 2006). O espaço costeiro é modelado e remodelado em escalas temporais e espaciais, tendo como resultado o balanço de sedimentos, as alterações climáticas e as variações do nível do mar, que interagem com a dinâmica costeira, bem como, as atividades e intervenções antrópicas (represamento de rios, dragagem, obras de engenharia, entre outras). Além disso, é um ambiente complexo e sensível, onde ocorrem diversos processos hidrodinâmicos que relacionam os ambientes continentais compostos por desembocaduras fluviais, estuários e deltas, e a dinâmica dos ambientes marinhos, como, ondas, correntes e marés, entre outros; além da intensa ocupação antrópica (Carneiro, 2003).

De acordo com o Capítulo 17 da Agenda 21 (Brasil, 2002), a região costeira corresponde ao ambiente marinho e continental, formado por um conjunto integrado de oceano, mar e zona costeira, componente essencial que possibilita a vida na Terra. A região é formada por ecossistemas de alta relevância ambiental, sendo marcada pela transição entre ambientes terrestres e marinhos, e pelas interações que caracterizam sua fragilidade.

Os ambientes costeiros são áreas de maior intercâmbio de energia da Terra por sua localização da área limítrofe entre o continente e o oceano. As praias e as dunas formam um sistema complexo, e, segundo Viles e Spencer (1995), denomina-se Zona Litorânea Ativa, diferenciando-se pela ação conjunta da intensidade eólica e direção das ondas, que promovem o transporte e a troca de sedimentos entre os componentes desse sistema. As dunas costeiras proporcionam condições de equilíbrio dinâmico e são de grande relevância do ponto vista geológico, estabelecendo um defensor natural da ação das ondas e ecológico, pela presença de espécie nativa. As zonas costeiras configuram uma região de intensa energia, caracterizada por frequentes mudanças morfológicas que contribuem para dissipar a energia incidente, protegendo a terra contra a ação erosiva do mar. Quando o processo de transporte nesses ambientes é alterado, seja por ocupação das dunas, construção de edificações, pela destruição da vegetação nativa, ocorre um desequilíbrio no balanço

sedimentar e, por conseguinte, da estabilidade da linha de costa, tornando-se vulnerável à ação da erosão costeira (Muehe, 2001).

O litoral potiguar abrange parte das bacias sedimentares Pernambuco-Paraíba e a Potiguar, pertencentes ao conjunto das bacias Mesocenoica brasileiras, que compõem a Província Costeira e a Margem Continental. Essas bacias têm sua origem relacionada a eventos geotectônicos que determinaram, a partir do Jurássico, a abertura do Oceano Atlântico Sul, e apresentam-se preenchidas por uma sedimentação Mesocenoica, onde os sedimentos quaternários compreendem importantes depósitos superficiais dessa sequência (Cunha, 2004).

Os processos modificadores das planícies costeiras se ligam à flutuação do nível do mar, ao aporte de sedimentos e aos processos costeiros dominantes (marés, ventos, correntes e ondas) que controlam a morfologia e a distribuição de sedimentos. A faixa costeira do Estado do Rio Grande do Norte é dominada por ondas, fortemente mesotidal e sob ação constante dos ventos alísios (Mabesoone, 1987).

A costa do estado do Rio Grande do Norte perfaz uma extensão de 470 km de litoral, constituída predominantemente por praias arenosas (72%) e falésias ativas (26%) segundo Muehe (2006). A linha de praia atual é quase contínua, sendo interrompida apenas pela presença de rios. As planícies costeiras são de origem quaternária, formando uma unidade geológico-geomorfológica bastante complexa, por serem ambientes de interação de fenômenos continentais e marinhos.

O Plano de Gerenciamento Costeiro do Rio Grande do Norte identificar a fonte (Lei n.º 6.950, de 20 de agosto de 1996) classificou a zona costeira em dois setores. O primeiro, denominado litoral oriental, de direção norte-sul, situado entre o município de Baía Formosa (limite com a Paraíba) e o município de Touros, com 195 km de extensão, onde se encontra a Formação Barreiras responsável pela existência de uma planície costeira estreita, bastante recortada com presença expressiva de dunas, estuários e manguezais. O município de Rio do Fogo, área da investigação, encontra-se nesse setor. O litoral norte é o segundo setor, de direção leste-oeste, que abrange o trecho localizado entre os municípios de São Miguel do Gostoso e o de Tibau, extremo norte (limite com o estado do Ceará), sendo caracterizados por sedimentos da Formação Barreiras apresentando em forma de falésias, afloramentos cretáceos à beira-mar e recifes arenosos, assim como extenso campo de dunas.

As dunas costeiras se destacam pela importância de atuar na transição entre o ambiente marinho e o meio terrestre, servindo de proteção às transgressões do nível do mar e evitando a contaminação dos aquíferos continentais pela água salgada (Carter, 1988). Essas áreas de acumulação eólica se encontram na costa do Rio Grande do Norte de forma bastante expressiva. Os campos de dunas existentes no litoral potiguar destacam-se pela riqueza de seus tipos e pela exuberância de suas formas; cada uma delas representa importante morfologia do sistema costeiro, necessitando ser mapeadas e monitoradas para subsidiar a preservação e sustentabilidade ambiental.

Um dos principais problemas dos espaços litorâneos ao redor do mundo é a ocupação antrópica das dunas costeiras, processo que desencadeia e intensifica dinâmicas naturais como a erosão costeira. No Brasil, diversas praias têm sofrido processos erosivos, requerendo medidas de recuperação ou contenção (Castro, 1994; Duarte, 2002; Carneiro, 2003; Manso et al., 2006; Gregório, 2009). Entretanto, segundo Nordstrom (2010), apesar de o tema ser bastante abordado nas instituições de pesquisa de todo o mundo, observa-se que as políticas de planejamento e ordenamento territorial, em especial aquelas na esfera da gestão costeira, os conhecimentos adquiridos têm sido pouco incorporados. Daí a importância de caracterizar e entender esses ambientes tão importantes para o equilíbrio ecológico no continente e no mar.

Diante da importância de se entender os ambientes costeiros no Brasil e mais especificamente, os campos de dunas costeiras do estado do Rio Grande do Norte, buscando-se estratégias de fornecer subsídios para sua conservação ambiental é o que se propõem o presente estudo. Para tanto, foram utilizadas técnicas das Geotecnologias; aliando, manipulação de dados espaciais gerados pelo mapeamento a laser aerotransportável

(LIDAR) com GPS (Global Positions System) para caracterizar a geomorfologia do campo de dunas de Rio do Fogo, classificando as diversas morfologias que compõem o relevo nessa porção do litoral potiguar.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no campo de dunas do município do Rio do Fogo, situado no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil (Figura 01). Apresenta uma extensão territorial de 150,262 km², distando 61,1 km de Natal, capital do Estado. O Município apresenta uma população de aproximadamente 10.830,00 habitantes e densidade demográfica de 66,94 hab./km² (IBGE, 2016). A sede do municipal localiza-se nas coordenadas geográficas de latitude 05016'22"S e longitude 35022'59"WGr. Limita-se a oeste com o município de Pureza, ao sul com o município de Maxaranguape, a leste com o Oceano Atlântico e ao norte com o município de Touros, conforme ilustra a Figura 1. (Carneiro, 2011).

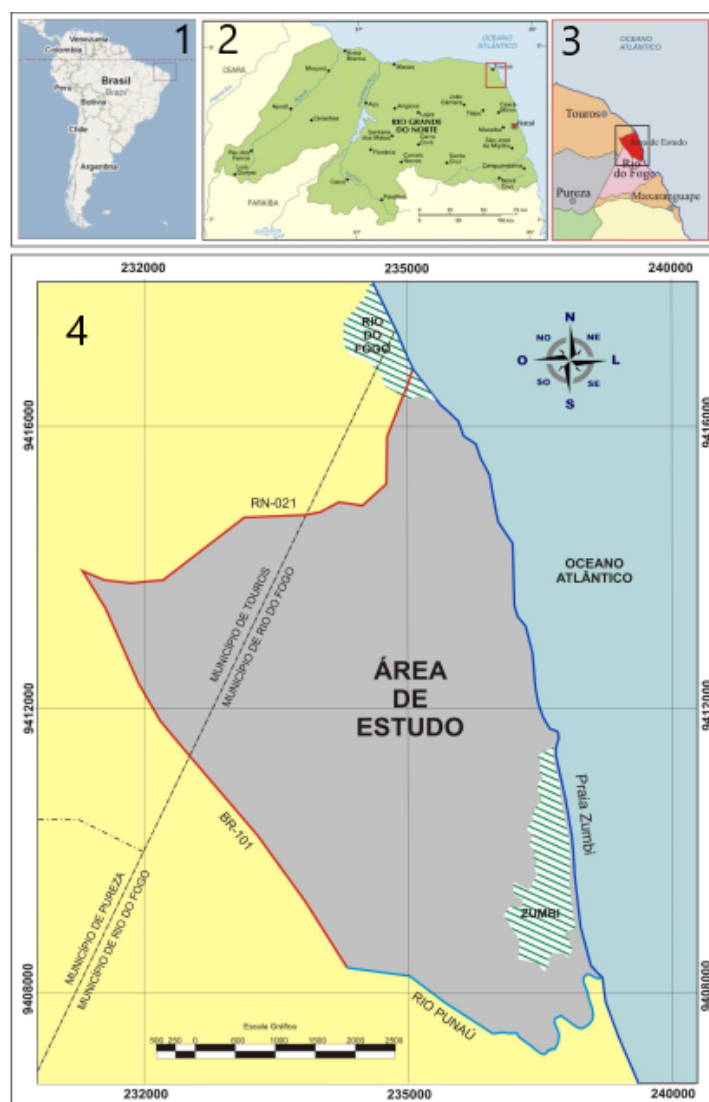


FIGURA 1.
Mapas de localização: 1) América do Sul; 2) Estado do Rio Grande do Norte - RN; 3) Município de Rio do Fogo - RN e; 4) Área de Estudo.

Praias de Rio do Fogo e Zumbi

O litoral do município de Rio do Fogo perfaz uma extensão de 16 km. A área de estudo localiza-se no município de Rio do Fogo, conforme ilustra a Figura 1; descrita a seguir: Começa na foz do Rio Punaú no Oceano Atlântico, segue por este Rio até a ponte na BR 101. Segue por esta BR 101 até a Rodovia estadual RN 021; segue por esta Rodovia até praia de Rio do Fogo; depois segue a direita pela praia até à foz do Rio Punaú, no Oceano Atlântico. Perfazendo uma área de aproximadamente 35,77 km². O campo de dunas móveis tem uma área de 5,31 km². A escolha desse recorte ambiental se deu em razão de ser área de influência do campo de dunas de Rio do Fogo.

A zona costeira dessa porção do Estado é formada por: planícies, tabuleiros costeiros e campos de dunas. Sendo esses últimos, os elementos predominantes em toda a costa, com exuberantes morfologias dunares ativas e fixas. Entrecortando os depósitos dunares na região, existem pequenas planícies fluviais localizadas nas desembocaduras dos rios e riachos, onde se destaca o Rio Punaú (Carneiro, 2011).

Na Praia do Zumbi, as variações morfodinâmicas refletem mudanças na topografia tridimensional da praia que interferem no comportamento do fluxo aerodinâmico sobre o pós-praia e no potencial de deriva eólica (Short e Hesp, 1982; Davidson-Arnott e Law, 1990). Essa praia apresenta maior mobilidade de sedimentos e morfologia que favorecem velocidades de fluxo laminar sobre o pós-praia e o processo de saltação dos grãos de areia média e fina para o interior do continente. Tais processos possibilitam a manutenção dos depósitos eólicos, dando continuidade aos processos de acumulação dunar.

O rio Punaú é um importante fornecedor das areias, o aporte de areias fluviais pode ser mais intensificado sazonalmente nos períodos climáticos de maior precipitação pluviométrica, esse rio contribui também para o fornecimento de sedimentos do campo de dunas, assim como, os sedimentos que vão ser distribuídos ao longo da faixa costeira do município de Rio do Fogo. Outro fator de contribuição do aporte de sedimentos é a deriva litorânea, principalmente na direção sul para norte (Diniz e Dominguez, 1999).

O volume de sedimentos transportados para o campo de dunas, desde a praia até as dunas primárias, rege-se pela orientação da linha de costa em relação ao vento predominante de SE e pelos fatores que influenciam o limiar de movimento dos sedimentos e a taxa de transporte das areias, tais como o tamanho das partículas sedimentares, conteúdo de umidade, crostas salinas, forma da praia entre outras (Sherman e Hotta, 1990).

Geologia Regional

A Geologia da parte centro-norte e todo o litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte, de acordo com Cunha (2004), forma-se por rochas e terrenos sedimentares—de formação mais recente—das eras Mesozoica e Cenozoica. Representam-se pela Formação Barreiras, a qual encontra-se recoberta por dunas que se estendem ao longo de toda a costa do estado. Constitui-se em ambientes frágeis quanto ao equilíbrio ecológico, sendo de grande importância para a recarga das águas subterrâneas e alimentação de rios, riachos e lagoas costeiras; calcários da Formação Jandaíra e os arenitos da Formação Açú, onde também se encontram minerais economicamente importantes como petróleo, calcário, argilas, diatomita, feldspato, caulim, entre outros.

Segundo Cunha (2004), repousam sobre esse arcabouço os sedimentos Mesocenoicos, constituindo uma estreita faixa semicontínua, que compõem, de norte a sul, as bacias sedimentares Potiguar e de Pernambuco-Paraíba. Bacias essas cuja gênese é associada ao processo de ruptura do Gondwana, evoluindo para uma fase transicional e, depois para outra fase de oceano aberto, sendo dessa fase os registros aflorantes. Superpostos a essas sequências e em discordância erosiva, ocorrem os sedimentos pliopleistocênicos da Formação Barreiras, que, por sua vez, são recobertos também discordantemente por sedimentos continentais e transicionais mais recentes.

Sistema de mapeamento a LASER - aerotransportado LIDAR

Mapeamentos topográficos planialtimétricos da elevação da superfície da Terra são empregados em diversas aplicações desde operacionais até científicas. As bases cartográficas produzidas auxiliam no conhecimento geológico e geomorfológico. Tais modelos servem para a individualização e classificação dos conjuntos geológicos e geomorfológicos que compõem a paisagem analisada.

Nos últimos cinquenta anos, a fotografia aérea, e posteriormente os sistemas óticos digitais, passaram a ser usados no mapeamento do relevo terrestre. Recentemente, surgiu o mapeamento a laser aerotransportado, também conhecido como Light Detection and Ranging (LIDAR), como uma tecnologia de alta precisão, notadamente quando o estudo necessita de modelos digitais de elevação com alta densidade de pontos e consequentemente alta resolução e precisão.

O mapeamento a laser aerotransportado tem diversas denominações, tais como LIDAR, Mapeamento do Terreno por Laser aerotransportado, Perfilamento a Laser, Laser Scanner Aerotransportado, Sistema Laser Scanner, Laser Scanning entre outras, porém, nesta pesquisa, adotou-se a denominação Mapeamento a Laser Aerotransportado (LIDAR).

A metodologia utilizada, segundo Brandalize (2004), baseia-se no tempo de emissão e recepção do pulso laser uni ou multidirecionais, com densidades de emissão de pulsos que podem superar os 100.000 pulsos por segundo. O Sistema Light Detection and Ranging (LIDAR) aerotransportado – Airborne Laser Scanner (ALS) – tem três componentes construtivos principais: Inertial Navigation System (INS), Global Positioning System (GPS) e o sistema de varredura a laser.

O cálculo da posição do ponto é obtido por meio da integração de dados provenientes do GPS e dos adquiridos por sensores inerciais. A medição das distâncias entre o sensor e a superfície é obtida pelo sistema de varredura a laser, que registra e processa a diferença de tempo entre o sinal (pulso laser) emitido pelo sensor e registrado pelo após interagir com o alvo (Rivas E Brito, 2003).

O sistema aerotransportado de laser (ALS) para o mapeamento do terreno – Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM) – captura coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) de pontos sobre uma superfície, além de determinar uma quarta dimensão, para cada ponto, definida como intensidade e representada pela letra I (Brandalize, 2004). A Figura 02 ilustra como um laser rangefinder (telêmetro a laser) varre a superfície registrando os pulsos (distâncias) e as respectivas direções (ângulos).

As vantagens no emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado são resultado de uma análise comparativa entre as técnicas que são capazes de gerar documentos cartográficos similares. A maior vantagem da técnica de mapeamento a laser aerotransportado está na rapidez com que os dados são coletados e processados. Com uma massa de dados representativa da superfície de interesse processada, obtém-se o Modelo Digital do Terreno. (Carneiro, 2011)

O sistema LIDAR permite a separação dos pulsos emitidos de maneira a posicionar os objetos em seu topo e ao nível do terreno, respectivos e genericamente denominados primeiro retorno (first pulse) e último retorno (last pulse). Cada pulso emitido pode resultar em diversos retornos como se observa na Figura 03. Cada retorno resulta uma medida de distância entre o sensor e o objeto. Esses sistemas normalmente são programados para gravar o primeiro e o último retorno, os quais possibilitam a construção do modelo digital de elevações (MDE) para o primeiro pulso e do Modelo Digital do Terreno (MDT) para o último pulso.

A técnica de mapeamento a laser aerotransportado possibilita levantar sobre a superfície do terreno uma nuvem de pontos semialeatoriamente distribuídos (Petzold et al., 1999) e gerar, a partir dessa nuvem, uma grade regular de pontos 3D georreferenciados – expressa sob a forma de um Digital Surface Model (DSM), Digital Elevation Model (DEM) ou Digital Terrain Model (DTM) (Carneiro, 2011).

Enquanto a aerofotogrametria opera com sensores passivos que obtêm somente imagens (fotografia aéreas digitais) da superfície do terreno. Por meio de levantamentos terrestres (levantamento planialtimétrico) e de processamento das imagens, é possível obter modelos digitais semelhantes aos obtidos pela

técnica de mapeamento a laser aerotransportado. O método tradicionalmente utilizado na geração de MDT é o estereofotogramétrico fundamentado no perfilamento de estereomodelos. Outro método estereofotogramétrico empregado é o por correlação de imagens (também denominado autocorrelação) (Carneiro, 2011).

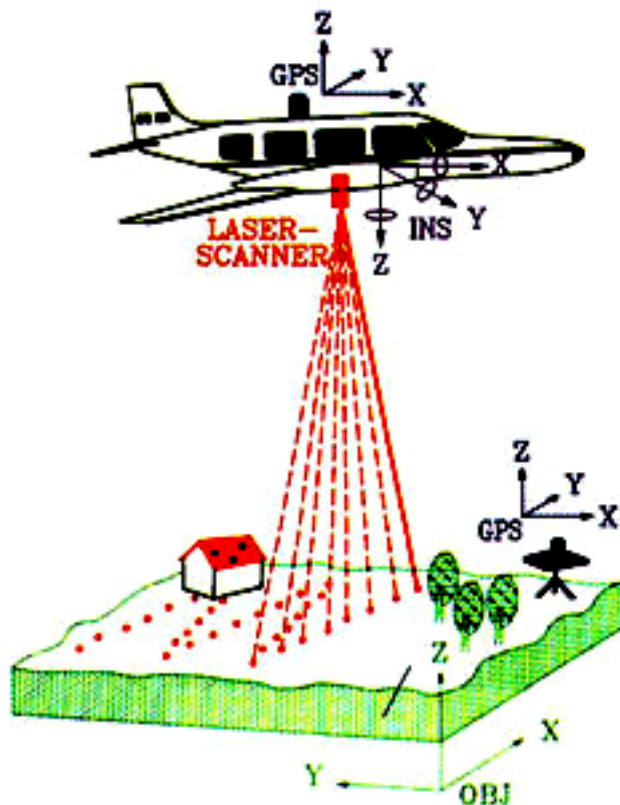


FIGURA 2
Sistema LIDAR
Fonte: Harding, 2002.

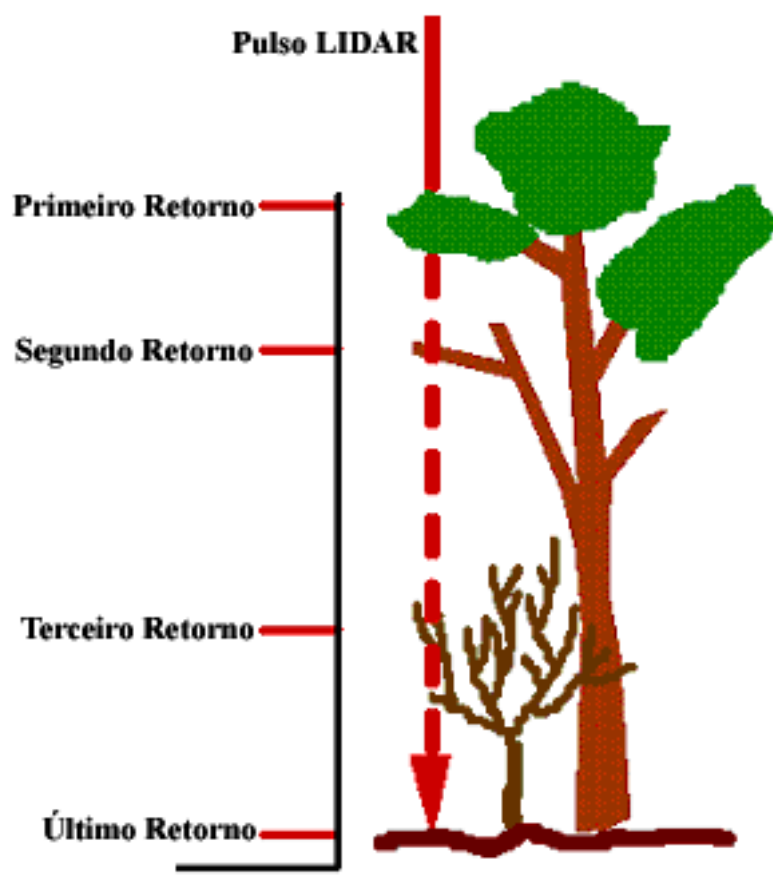


FIGURA 3
Seleção de retornos LIDAR.
Fonte: Harding, 2002.

O mapeamento a laser aerotransportado – LIDAR – é uma técnica monoscópica, de modo que um único pulso LASER atingindo o solo já é suficiente para que se obtenha a altitude naquele ponto, enquanto pela Fotogrametria, torna-se necessário que o mesmo ponto seja claramente visível em duas fotografias, pelo menos, para se determinar a altitude do terreno, o que é probabilisticamente muito difícil em terrenos recobertos de árvores. O mapeamento a laser opera com excelentes e diferentes resultados em superfícies homogêneas como: desertos, áreas de dunas e geleiras, o que usualmente traz dificuldades durante as medições fotogramétricas pela falta de pontos identificáveis (Carneiro, 2011).

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada fundamenta-se na integração dos tradicionais métodos analíticos das Geociências com as modernas Tecnologias da Geoinformação, norteando-se de acordo com as recomendações da União Geográfica Internacional (UGI). A Figura 4 apresenta as principais etapas da metodologia da pesquisa.

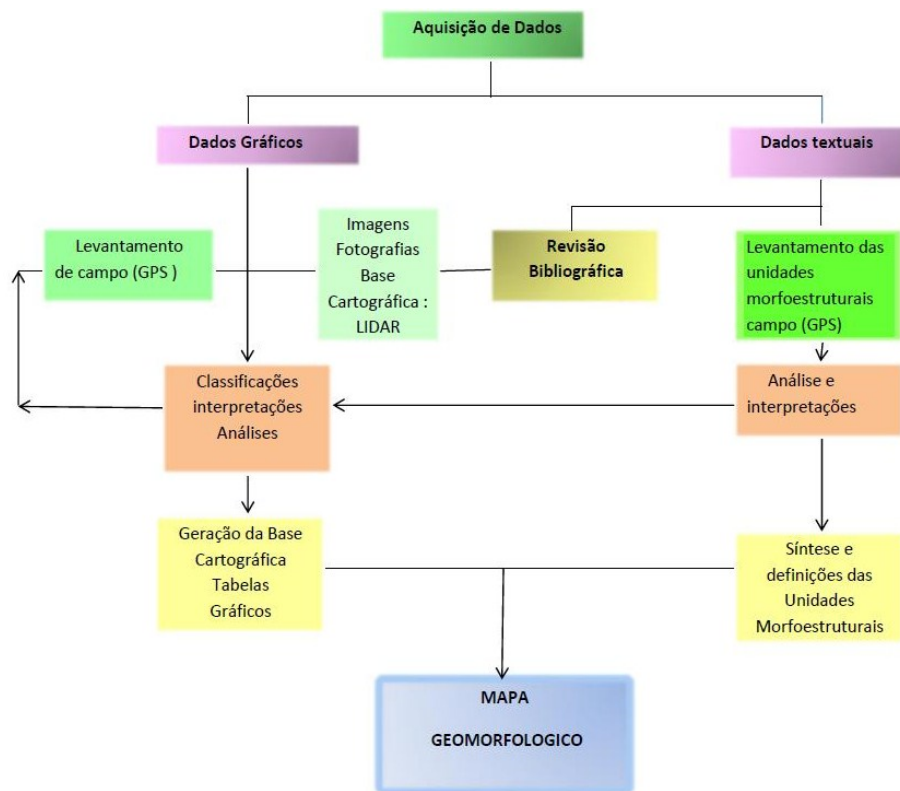


FIGURA 4
Esquema da metodologia da pesquisa

Materiais

Os programas e equipamentos utilizados na pesquisa foram cedidos pelo IBGE, Geoid S.A. e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Nos procedimentos foram utilizados os seguintes programas: (i) Microstation e AUTOCAD – Programas tipo Computer Aided Designer (CAD), que fornece as ferramentas necessárias à digitalização de mapas, plantas, desenhos entre outros por meio da mesa digitalizadora ou da tela; (ii) ArcView – Programa Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permite geração de mapas, conexão com banco de dados, disponibilidade de uma linguagem de programação, entre outros; (iii) REALM Survey Suite (Optech) – Software de pós-processamentos dos dados integrados (dados GPS e dados ALTM). Atualmente esse software se denomina DASH MAP REALM; (iv) PRISM (Ashetech Precision GPS Surveying Software) é um programa que permite a preparação do processamento e o ajustamento dos dados coletados, bem como processar os dados obtidos em levantamentos cinemáticos ou pseudocinemático; (v) GPSurvey – Programa que possibilita o pós-processamento dos levantamentos GPS, do fabricante TRIMBLE; (vi) ALTM – NAV Planner 2.0.61 – programa utilizado para elaborar o Planejamento do voo; (vii) TerraScan – programa utilizado para filtragem dos pontos (Laser), e o (viii) TERRA Model (Trimble) programa que permite importar dados LIDAR e geração de mapas.

Em relação aos equipamentos, utilizaram-se: dois receptores de Global Positioning System (GPS), com duas frequências e 20 canais, e as respectivas antenas; Airborne Laser Terrain Mapper 1210 (ALTM); Airborne Laser Scanning (ALS); Aeronave Cessna C180; microcomputador e Notebook, entre outros.

Método

1. *Aquisição de Dados (Gráficos e Texturais)*

1.2 *Coleta de dados (Bibliográficos, Imagens e Fotografias atuais e pretéritas) e planejamento de campo*

O estudo envolveu pesquisa e análise bibliográfica em diversos artigos e documentos científicos (Nacionais e Internacionais); vários trabalhos de campo na área da pesquisa; visitas e entrevista com pesquisadores de diversos órgãos públicos: no Brasil, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 3.^a Divisão de Levantamento Comando do Exército em Olinda, IDEMA (Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do estado do Rio Grande do Norte), entre outros.

A análise dos documentos cartográficos (cartas topográficas, fotografias aéreas, imagens de satélites, entre outros) atuais e pretéritos, subsidiou o planejamento do voo no que se refere ao georreferenciamento das poligonais da varredura laser.

2. *Levantamento de campo*

O levantamento LIDAR aerotransportável e o pós-processamento dos dados necessitou de uma base GPS no local do mapeamento, representando assim a primeira etapa do levantamento. Nesta pesquisa foi definida e ocupada uma estação dentro da área de estudo. Nesse mapeamento a laser, um receptor GPS localizado no Sistema de Medição Inercial (SMI) registrou a posição da aeronave a intervalos fixos. Outro receptor baseado no solo (base GPS) forneceu a correção diferencial para a determinação de posição mais precisa. O DGPS (GPS Diferencial) é um método de refinamento dos dados posicionais derivados do rastreamento GPS por meio da correção de erros inerentes ao processo.

Brandalize (2004) descreve como linha base o uso de dois aparelhos GPS que coletam informações da constelação GPS ao mesmo tempo. Nesse contexto, a linha base é a distância entre o aparelho localizado no solo e o aparelho aerotransportado. De acordo com recomendações do fabricante dos sistemas, a distância entre os aparelhos deve ser inferior a 50km. Outra recomendação é que as bases de solo também devem estar espaçadas em, no máximo, 50 km para garantia da precisão planimétrica dos pontos LASER. Sempre que tal condição não puder ser estabelecida, o uso de um conjunto de bases terrestres é requerido.

Nos levantamentos terrestres, utilizaram-se equipamentos de GPS geodésicos de dupla frequência (L1 e L2) para leituras em sistema de pós-processamento e tempo real (RTK). No transporte de coordenadas, aplicou-se o método de levantamento GPS estático para as estações base GPS.

A base GPS utilizada localiza-se no campo de dunas de Rio do Fogo, dentro do Parque Eólico de Rio do Fogo. Na seleção do local da base GPS, observaram-se as recomendações do fabricante e especificações da norma técnica (IBGE, 1993) quanto à obstrução do sinal GPS, ou seja, as observações GPS requerem a intervisibilidade entre a estação e os satélites.

3. *Base Cartográfica*

3.1 *Planejamento e execução dos voos*

No voo, utilizou-se uma aeronave Cessna C180 equipada com Laser Aerotransportado Tecnologia LIDAR, denominado Airborn Laser Terrain Mapper (ALTM). O equipamento ALTM emitiu pontos sobre o

terreno, encontrando resultados melhor que 1,6 m de equidistância média entre os pontos, para detalhar as principais feições de solo, vegetação, edificações entre outros. A frequência do aerolevante a laser foi de 19Hz. Para tanto, realizaram-se aerolevantes LIDAR em dois momentos: 8 de novembro de 2004 no período de verão.

3.2 *Processamento e análise dos dados*

O pós-processamento realizou-se mediante um conjunto de programas e equipamentos para os dados coletados, chamados Dados Brutos (Raw Data). Os citados dados, referem-se as medidas LASER com os respectivos atributos, dados do GPS aerotransportado e dados da navegação inercial. Além dos dados do levantamento propriamente dito, no instante do processamento, incorporam-se os dados de calibração do sistema e parâmetros como excentricidade da antena GPS em relação ao sensor LASER; ângulos de montagem da plataforma do sensor LASER quando a aeronave está nivelada no solo; posição do sensor LASER em relação ao SMI. A precisão planialtimétrica alcançada foi num intervalo de 15 centímetros.

3.3 *Levantamento das unidades morfoestruturais e delimitação das unidades geomorfológicas (análise e interpretações)*

Na elaboração da base de dados espaciais por meio da tecnologia de mapeamento a laser aerotransportado (LIDAR), realizou-se o voo pela Empresa Geoid Ltda, patrocinadora desta pesquisa. No levantamento a laser, captaram-se 100.000 pontos/segundos. Para tanto, foi necessária uma filtragem automática da nuvem de pontos LASER com o objetivo de separá-los em pontos que tocaram à superfície terrestre e os pontos que tocaram outros elementos (objetos). Essa filtragem realizou-se pelo programa TerraScan, que tem uma ferramenta específica para essa tarefa (classify – routine – ground). Essa etapa denomina-se filtragem dos pontos.

A nuvem de pontos coletados em média, 5 pontos/m², definida na filtragem como não pertencente à superfície terrestre, foi separada por meio de planos de informações, ou seja, separando os principais elementos encontrados na área de estudo. Essa etapa se denomina classificação, e tem como objetivo principal auxiliar a encontrar pontos pertencentes à superfície terrestre.

Os pontos selecionados como pertencentes ao solo foram utilizados na elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT). Os demais planos de informações classificados (vegetação, construção entre outras) foram usados para gerar Modelo Digital de Elevação (MDE).

A classificação em MDT e MDE foi realizada por meio de algoritmos específicos; a acurácia desses modelos vincula-se fortemente ao algoritmo utilizado e ao percentual de pontos que retornam do solo. Estudos de Reutebuch et al. (2003) comprovam a acurácia de Modelos Digitais de Terreno em áreas até de vegetação densa.

De posse dos dados, LIDAR, foi possível elaborar os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e individualizar os conjuntos geomorfológicos e suas morfologias associadas. Para isso, seguindo as recomendações da UGI para mapeamentos geomorfológicos de detalhe, utilizou-se a conservação e/ou dissecação das morfologias cólicas presentes na área como critério de classificação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo como base o grau de conservação morfológica, foram identificados dois conjuntos morfológicos bem distintos, uma planície de acumulação cólica dunar e uma planície de acumulação cólica retrabalhada.

Depósitos eólicos

Na costa do Rio Grande do Norte estão presentes várias gerações de dunas, porém é bastante difícil determinar se elas se formaram por um ou vários episódios de formação. Entretanto, Maia (1998) cita que podem ser diferenciadas por uma série de variáveis: a forma, a diferença de coloração, tipo da vegetação e o grau de sedimentação. De acordo com Maia (1998), as relações estratigráficas (Figura 5) diferenciam até três gerações de dunas, enquanto no litoral oeste do Ceará, identificou-se a quarta geração de dunas.

Maia (1998) cita que a geração mais antiga, sem forma designada (paleodunas), encontra-se em contato direto com a Formação Barreiras. Essas paleodunas são formadas por areias quartzosas inconsolidadas, variando de bem a moderadamente selecionadas, com granulometria de fina a média. Enquanto a segunda geração de dunas consiste nas dunas parabólicas inativas, composta de areias quartzosas inconsolidadas, variando de bem a moderadamente selecionada, e granulometria de fina a média.

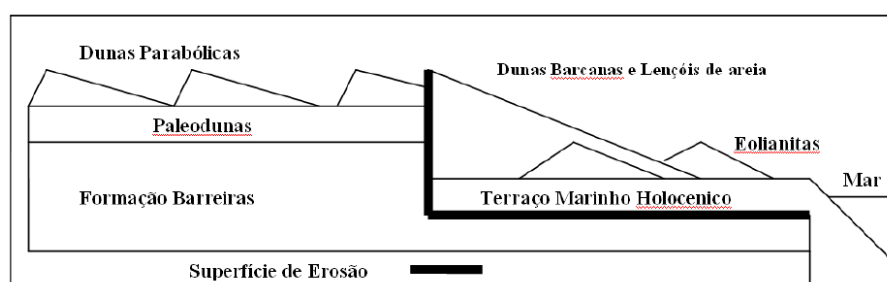


FIGURA 5.
Relações estratigráficas entre as gerações de dunas.
Fonte: Maia (1998)

Quanto à origem geológica das dunas parabólicas vegetadas no estado do Rio Grande do Norte, segundo Amaral (2000), sua formação começa no Pleistoceno, sob um nível do mar mais baixo que o atual, de forma a possibilitar a existência de uma pista para o transporte dos sedimentos por via eólica. Essas dunas desenvolveram-se sobre a Formação Barreiras, cujo limite continental teria sido equidistante da linha de costa atual, a qual é aproximadamente paralela à quebra da plataforma, limite oceânico máximo da antiga pista de movimentação dos sedimentos. Em um momento qualquer, reativações tectônicas estabeleceram a geometria em mosaico do embasamento, que encaixou os principais vales fluviais, cruzando transversalmente os campos de dunas. Os lençóis de dunas parabólicas continuaram a se formar, tendo o seu limite à barlavento, agora, nos canais fluviais mais importantes. A existência de um período climático mais úmido do que o atual possibilitou o desenvolvimento de uma cobertura vegetal densa que fixou os lençóis de dunas (Amaral, 2000, p.228-229).

A terceira geração de dunas, de acordo com Maia (1998), compõe-se de sedimentos ricos em bioclastos (eolianitas), formam-se por dunas arenosas cimentadas por carbonato de cálcio e se encontram no litoral do Ceará. Essas dunas podem estar associadas a, no mínimo, 4.000 anos.

A quarta geração de dunas consiste nas dunas ativas, que se associam ao desenvolvimento do litoral atual e penetram no continente até 6 km. Compõem-se predominantemente de quartzo, em grãos de areia arredondados, bem selecionados e de coloração clara. Em alguns trechos, podem-se encontrar restos líticos, minerais pesados e carapaças de organismos marinhos. Essas dunas se localizam entre 600 a 2000 metros de distância da praia, e migram em cima das gerações anteriores e da Formação Barreiras. Em resumo, as quatro gerações de dunas se associam a flutuações do nível do mar durante Quaternário (Maia, 1998).

Na área de estudo, encontra-se um ecossistema dunar que apresenta as seguintes classificações, segundo o Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Rio Grande do Norte (Figura 6): (1) dunas ativas ou migratórias ou móveis ou recentes: barcanas, cristas barcanoides e parabólicas; (2) dunas inativas ou estacionárias ou fixas ou paleodunas com morfologia tênue (Barreto, 2004). Entretanto, diversos estudos

pesquisados – Duarte (2002); Silva (2002); Branco et al. (2003); Fracasso (2005) – revelam que, no litoral do Rio Grande do Norte, encontram-se também dunas de blowouts (feições de deflação) ou lobos deposicionais, estrelas, dômicas, frontais (foredunes), longitudinais, reversas, transversais, lençóis de areia (sand sheet), nebkha, coppice e hummock), e zonas interdunares.

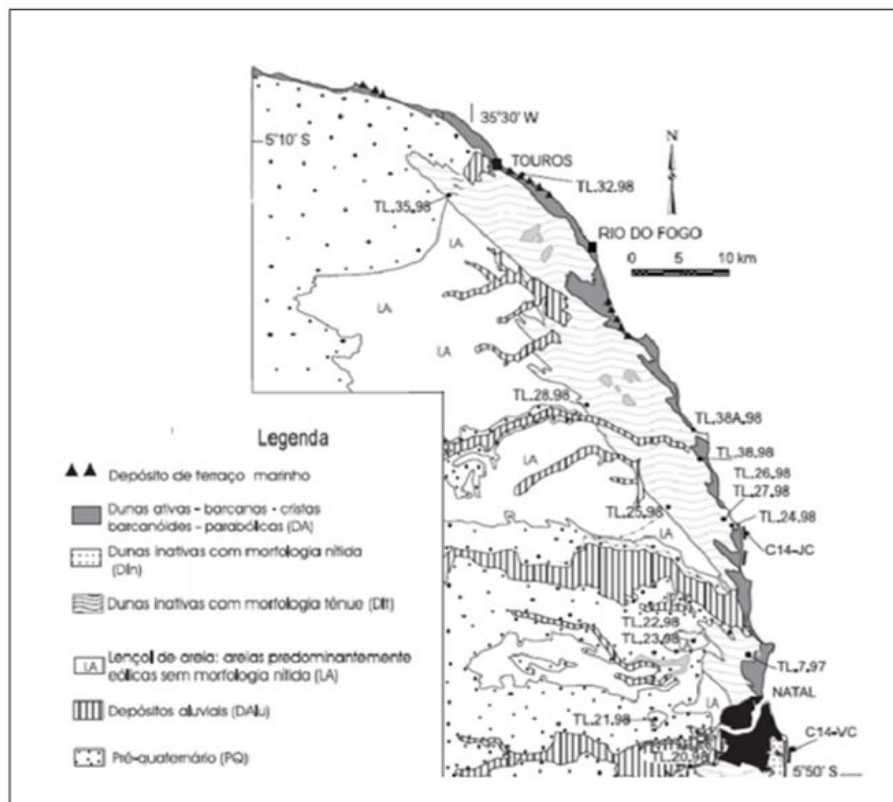


FIGURA 6
Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Rio Grande do Norte
Fonte: Modificada de Barreto et al., 2004.

Padrão morfológico e direção atual dos ventos

O vento é um importante agente geológico, bastante eficaz no transporte e deposição de partículas sedimentares. As areias são sopradas pelo vento sem a contribuição de fluxos hídricos, dando origem a depósitos bem selecionados. O transporte se dá por suspensão das partículas finas (0,05mm) e rolamento, grânulos maiores (2,0mm). As partículas maiores são movimentadas pelo impacto de outras partículas em saltação (Suguio, 1980). O resultado dessa movimentação é a formação de campos de dunas.

A formação e fixação desses depósitos arenosos é condicionada por algumas características ambientais bem definidas. O clima não é o único fator responsável pela formação desses pacotes sedimentares, a dinâmica natural dessas áreas está muito ligada à existência de uma área fonte, da falta de competência da cobertura vegetal e da intensa ação do vento frente ao relevo.

Segundo Amarante et al. (2003), o Estado do Rio Grande do Norte está situado numa zona de predomínio dos ventos alísios, resultando em ventos com grande constância e acentuada ocorrência de direções sudeste (Figura 7). Os ventos intensos ocorrem no período que se estende do final da manhã ao meio da tarde. O regime de ventos sobre o Estado do Rio Grande do Norte apresenta uma grande sazonalidade, em geral, com a ocorrência de ventos mais intensos nos meses de final de inverno e primavera (agosto a novembro), e mais brandos nos meses de final de verão e outono (fevereiro a maio).

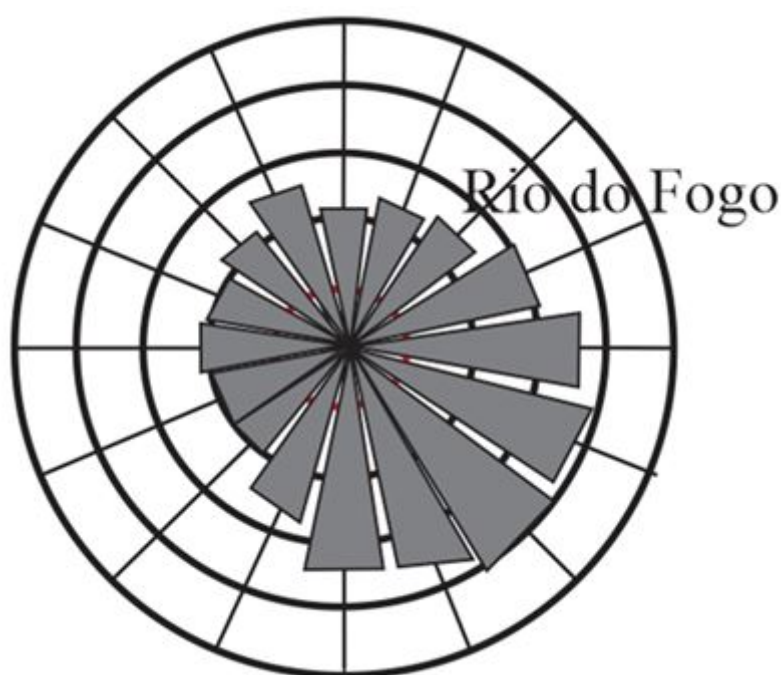


FIGURA 7
Rosa dos Ventos de Rio de Fogo
Fonte: Amarante et al., 2003.

Geomorfologia de Rio do Fogo

A região de Rio do fogo apresenta uma geomorfologia relativamente monótona, desenvolvida sobre depósitos neogênicos eólicos. A fonte dessas areias são os terraços marinhos e flúvio-marinhos presentes ao longo da costa. Como embasamento a esses depósitos, afloram rochas sedimentares de idade cretácea, recobertas pela Formação Barreiras (Suguio, 2001; Barreto et al. 2004; Muehe, 2006).

Segundo Goldsmith (1978), Reineck e Sing (1980), McKee (1983), as dunas eólicas se formam por acumulações arenosas geralmente assimétricas, ocorrendo isoladamente ou de forma associada, que podem atingir algumas centenas de metros de altura e quilômetros de comprimento. Tem como característica principal a presença de uma face de inclinação suave, formada na direção preferencial do vento (face de barlavento ou stoss side ou windward) e de outra face, com inclinação mais íngreme, que é a face de sotavento ou Lee ou leeward. Tais características podem ser observadas nas dunas mapeadas em Rio do Fogo, sobretudo naquela cuja morfologia eólica encontra-se melhor conservadas.

Sherman (1995) afirma que as dunas arenosas ou sistema de dunas representam a integração de uma suíte de processos geomórficos e respostas sedimentares sobre uma extensão particular de tempo e espaço, sendo, portanto, extremamente dinâmico e estando constantemente em processo de mudança. As dunas costeiras representam o resultado da interação de processos marinhos e eólicos, vegetação, pressão humana e a geomorfologia do sistema. Além disso, a forma das dunas (costeiras) obedece a uma série de fatores incluindo o formato da linha de costa, formato da praia, correntes e ondulações (swell) dos oceanos, vento predominante, frequência das ressacas e tamanho das partículas de areia. Tais características foram observadas e mapeadas na área estudada, individualizando-se as morfologias conservadas e dissipadas, além dos padrões morfológicos.

As dunas podem ser classificadas por sua dinâmica deposicional e/ou erosional, sendo reconhecidos os seguintes tipos: dunas estacionárias e dunas migratórias (Glennie, 1970; Reineck e Sing, 1980). Na área

estudada, esses dois conjuntos foram mapeados, recebendo as nomenclaturas de dunas ativas e inativas, em corroboração com outras referências mais recentes consultadas no decorrer do presente estudo.

De acordo com Pye e Tsoar, (1990), as dunas simples são divididas em três grupos básicos, cada qual com diversas morfologias, sendo ele: (a) aquelas em que seu desenvolvimento se relaciona com a presença de obstáculos topográficos, (b) aquelas que se desenvolvem da própria acumulação; e (c) aquelas cujo desenvolvimento se influencia fortemente pela vegetação (dunas fitogenéticas).

O estudo de Castro (2004) ressalta que o deslocamento anual das dunas é proporcional aos índices pluviométricos registrados na área. Afirma-se, assim, que, quanto maior for o índice pluviométrico, menor será a taxa de deslocamento das dunas. O resultado do estudo citado, ressalta também, que as precipitações pluviométricas na área da pesquisa controlam não somente o deslocamento de dunas, mas também o suprimento de sedimento para o sistema eólico. Na área de estudo, os índices pluviométricos mostram valores elevados, característicos das regiões úmidas da faixa oriental do Nordeste. Tal característica favorece a fixação das dunas, por fixação de uma cobertura vegetal pioneira, restinga, que gradativamente vai possibilitando as características necessárias para a sucessão botânica e consequentemente coberturas vegetacionais mais densas, fixando as morfologias eólicas.

O campo de dunas analisados é composto predominantemente por uma morfologia de um sistema dunar litorâneo. As diversas morfologias eólicas foram identificadas mediante a interpretação das imagens de pontos geradas pelo LIDAR aliada ao Modelo Digital do Terreno. Depois da interpretação, posicionou-se as unidades morfológicas em dois conjuntos morfoesculturais, bem como, suas subunidades morfológicas (Figura 8). Esses conjuntos correspondem: o primeiro conjunto morfoescultural é a Planície de Acumulação Eólica Dunar (PAED) com as unidades morfológicas, (I1) campo de dunas parabólicas ativas – PA; (I2) campo de dunas com morfologia barcanoide dissipada – B; (I3) campo de dunas parabólicas inativas – PI; e (I4) campo de dunas com morfologia dissipada - D. O segundo conjunto morfoescultural compreende a Planície de Acumulação Eólica Retrabalhada (PAER) e suas unidades morfológicas são: (II1) lençóis de areia – L; e (II2) Terraços Marinhos e Cordões Litorâneos – T.

I. Planície de Acumulação Eólica Dunar – PAED

Essa unidade corresponde às morfologias formadas por edifícios dunares distribuídos ao sul da PAE e apresenta 2 conjuntos morfológicos descritos a seguir:

I.1. Dunas Parabólicas Ativas (PA)

As dunas parabólicas ativas, ciclo de movimentação eólica atual, predominam em toda a porção leste da área, adentrando também sua porção centro sul. São caracterizadas por edifícios dunares com altitudes que variam entre 25 e 56 m, com movimentação de material trazido pelo rio Punaú, que costa a porção extremo sul de sua ocorrência, bem como da maior oferta de areias, devido ao rebaixamento do nível do mar durante o Holoceno. Essas morfologias apresentam intensa migração, sendo por vezes barradas ou fixadas por pequenos obstáculos, em sua maioria arbustos da vegetação incipiente que consegue sobreviver as condições ambientais locais. Outro elemento fixador da migração das areias corresponde a edifícios dunares mais antigos, com morfologia parcialmente dissipadas, recobertos por uma vegetação arbustiva mais densa, oferecendo resistência a migração das referidas dunas.

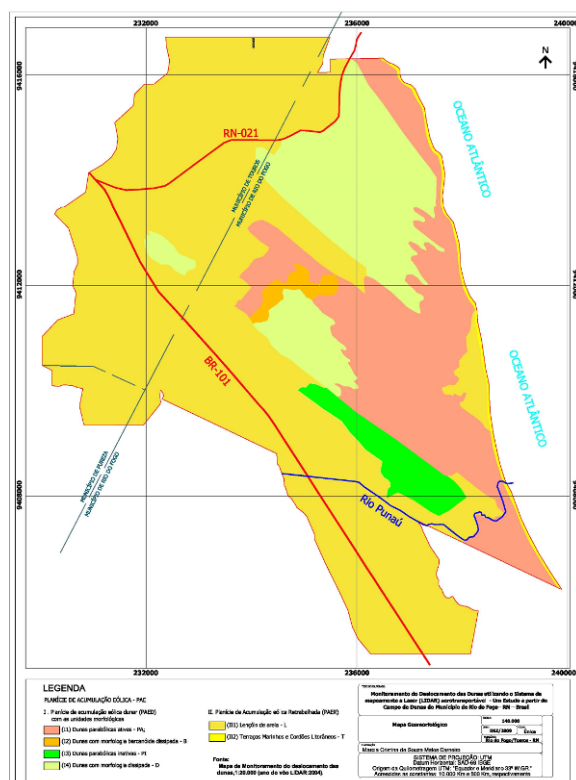


FIGURA 8.

Mapa geomorfológico da Região de Rio do Fogo, litoral norte do Estado do Rio Grande do Norte.

1.2. Dunas Com Morfologia Barcanóide Dissipada (B)

Na porção central da área, observa-se um padrão morfológico bem diferenciado, com edifícios dunares barcanóides (Figura 9). Essas dunas, com morfologia parcialmente dissipada, só foram identificadas nessa porção, da área estudada. Compreendendo formas reliquiais, evidências de mudança no padrão dos ventos e presença de barreiras de fixação em um período intermediário, entre a formação das morfologias que já estão totalmente dissipadas, mais antigas, e as dunas ativas atuais. Apresentam altimetrias que variam entre 30 e 40 m, pouco expressivas para o conjunto dos terrenos eólicos mapeados.



FIGURA 9.
Duna Barcanóide com morfologia parcialmente dissipada

1.3. Dunas Parabólicas Inativas (PI)

Correspondem a edifícios dunares com fisionomia parabólica ainda nítidas em imagens de satélite e fotografias aéreas, começando a serem atacados pelos processos morfodinâmicos locais, caracterizados pela atividade morfodinâmica denudacional, apresentando parte de sua morfologia original levemente dissecada. Possuem altitudes médias de cerca de 40m em relação ao nível de base circundante e estão distribuídas na parte sul da PAED, na margem esquerda do Rio Punaú.

1.4. Dunas com Morfologia Dissipada (D)

Edifícios dunares muito dissecados pela rede de drenagem e processos morfodinâmicos locais, perdendo parte de suas características morfológicas iniciais. Essas morfologias apresentam altitudes médias entre 20 e 30 m em relação ao nível de base circundante e estão distribuídos na porção central da área, em uma faixa de transição entre o campo de dunas ativas (PA) e o de dunas com morfologia dissipada (D). (Figura 10)



FIGURA 10

Vista panorâmica da área de contato entre lenções de areia e dunas inativas com morfologia dissipada.

II. Planície de Acumulação Eólica Retrabalhada – PAER

Essa unidade corresponde a uma ampla área arenosa levemente ondulada, formada por morfologias monótonas distribuídas a norte da PAED, cujo conjunto morfológico está descrito a seguir:

II.1. Lençóis de Areia (L)

são amplas superfícies arenosas, com morfologia suave ondulada, distribuídas em todas as porções norte (Figura 11), sul e oeste da PAER, compreendendo mais de 50% de toda a área estudada. O relevo é monótono e com pouca variação altimétrica, formando extensas faixas arenosas aplainadas, recortadas por canais de drenagem efêmeros e de pequena extensão. Nessas áreas se desenvolveu uma vegetação mais densa, diminuindo a eficiência da movimentação eólica, levando à estabilização.

II.2. Terraços Marinheiros e Cordões Arenosos (T)

Os terraços marinhos e cordões arenosos são o resultado da progradação da linha de costa, ora pela maior oferta de areias trazidas pelo rio Punaú, ora pela corrente de deriva litorânea. Outro fator importante foi o rebaixamento do nível do mar durante o Holoceno, resultando em um maior desnivelamento entre os terraços e cordões atuais em relação aqueles mais antigos formados durante o Pleistoceno Tardio. Compreendem extensas faixas arenosas dispostas paralelamente a linha de costa, intercaladas pelo estuário do rio Punaú e por pequenos edifícios dunares de pequena amplitude altimétrica, distribuídos em áreas com maior deposição arenosa e consequente retrabalhamento eólico.



FIGURA 11
Terraços Marinhos e cordões arenosos – Praia do Rio do Fogo

CONCLUSÕES

O rio Punaú é um importante fornecedor das areias, o aporte de areias fluviais pode ser mais intensificado sazonalmente nos períodos climáticos de maior precipitação pluviométrica, esse rio contribui também para o fornecimento de sedimentos do campo de dunas, assim como, os sedimentos que vão ser distribuídos ao longo da faixa costeira do município de Rio do Fogo. Outro fator de contribuição do aporte de sedimentos é a deriva litorânea, principalmente na direção sul para norte.

Segundo pesquisa de Barreto (2004) os terraços marinhos do litoral do Rio Grande do Norte apresentam dois conjuntos de idades pleistocênicas sendo o mais antigo, com 210.000 – 214.000 anos (Ponta Negra, Barra de Tabatinga e Baía Formosa) e o mais recente, com 120.000 – 114.000 anos (São Bento, Touros, Rio do Fogo-Zumbi). As rochas praias vêm sendo formadas continuamente por todo o este litoral, desde o Holoceno médio até o Presente, mas os corpos mais extensos mostram as idades mais antigas, isto é, entre 5.600 – 7.400 anos cal AP e 4.380 – 5.310 anos cal AP, e podem representar o momento de desaceleração da subida do nível medio dos mares, em escala milenar.

O volume de sedimentos transportados para o campo de dunas, desde a praia até as dunas primárias, rege-se pela orientação da linha de costa em relação ao vento predominante de SE e pelos fatores que influenciam o limiar de movimento dos sedimentos e a taxa de transporte das areias, tais como o tamanho das partículas sedimentares, conteúdo de umidade, crostas salinas, forma da praia entre outras.

A evolução e o desenvolvimento das dunas costeiras dependem da relação entre três variáveis: (I) disponibilidade de sedimentos inconsolidados; (II) atuação do vento com suficiente intensidade; e (III) existência de uma superfície plana e desnuda de vegetação para migração e formação das dunas.

Observa-se que as dunas barcanas móveis mantêm suas características morfológicas após o deslocamento. Isso ocorre em razão do estado de equilíbrio e da natureza tridimensional desse tipo de duna. Essa comprovação da pesquisa de Castro foi observada e confirmada também nesta pesquisa.

No mapa geomorfológico, posicionaram-se as morfologias que compõem a primeira a planície de acumulação eólica dunar e retrabalhada do campo de dunas de Rio do Fogo, em que se conclui que há presença de: (i) campo de dunas parabólicas ativas - PA; (ii) campo de dunas com morfologia barcanoide dissipada - B;

(iii) campo de dunas parabólicas inativas - PI; e (iv) campo de dunas com morfologia dissipada - D. A segunda unidade morfoescultural compreende a Planície de Acumulação Eólica Retrabalhada (PAER) e há presença das unidades morfológicas: (i) Lençóis de Areia - L; e (ii) Terraços Marinhos e Cordões Litorâneos - T.

Em razão da grande fragilidade ambiental encontrada na área do estudo e em todo o litoral potiguar, onde a estratégia de desenvolvimento se direciona à vocação turística do município e à ocupação antrópica, observa-se a necessidade premente de se efetivar a adoção de políticas públicas capazes de mitigar os impactos detectados nesse ecossistema, bem como a aplicação de leis complementares que coíbam e regulem o uso do solo na área de dunas e seu entorno, ressaltando que tais medidas deverão ser acompanhadas da elaboração de Planos de Manejo para recuperar as áreas degradadas.

A metodologia utilizada se mostrou bastante satisfatória, contribuindo com diversos dados científicos numa área região ainda muito carente de dados paleoambientais.

As irregularidades topográficas e os terrenos um pouco movimentados em escala local são em grande parte proporcionados pela presença de campos e cordões de dunas, cujas características de permoporosidade impedem que ocorra escoamento superficial direto e otimize o processo de infiltração de águas de chuva. Esse aspecto torna por demais importantes a preservação das dunas, tendo em vista sua característica como unidade hidráulica para que se processe a transferência e recarga dos sistemas aquíferos locais, especialmente o aquífero Barreiras, mais profundo. De forma que propicie a preservação e integridade do abastecimento d'água às futuras gerações, assim como para a manutenção do geossistema local e possibilitando o equilíbrio da cunha salina, cuja preservação deve ser muito mais garantida.

a das dunas.

A existência de uma perfeita correlação inversamente proporcional entre a taxa de migração, e a pluviometria demonstra o expressivo controle climático no desenvolvimento e movimentação das dunas eólicas na região. Pode-se destacar que existe uma importância da leitura dos fenômenos do tipo 'El Niño' e 'La Niña' para seu desenvolvimento.

Conclui-se que, para preservar campo de dunas ativas ou móveis, deve-se elaborar um estudo de análise da evolução histórica e evolutiva das feições do campo de dunas, subsidiando análise da previsão ambiental futura direcionada na perspectiva da preservação, permitindo sua sustentabilidade para gerações futuras.

REFERENCIAS

- Amarante, O. A. C., Lima da Silva, F. J. y Rios Filho, L. G. (2003). Potencial eólico do Estado do Rio Grande do Norte - Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento COSERN – ANEEL. Iberdrola Empreendimentos do Brasil/Camargo Shubert. 47p.
- Amaral, R. F. (2000). Contribuição ao estudo da evolução morfodinâmica do litoral oriental sul do Rio Grande do Norte, entre Ponta de Búzios e Baía Formosa. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Ciências, Universidade do Rio Grande do Sul.
- Barreto, A. M. F., Suguio, K., Bezerra, F. H. R., Tatumi, S. H., Yee, H. y Giannini, P. C. F., (2004). Geologia e geomorfologia do quaternário costeiro do estado do Rio Grande do Norte. Geologia USP, Série Científica, 4(2): 1-12.
- Branco, M. P. N. C., Lehugeur, L. G. O. y Campos, J. E. G. (2003). Proposta de classificação para as feições eólicas do setor leste da região metropolitana de Fortaleza, Ceará, Brasil. Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará. Geociências, 22(2): 162-174.
- Brandalize, M. C. B. (2004). A qualidade cartográfica dos resultados do laserscanner aerotransportado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Brasil. (2002). Ministério do Meio Ambiente. Agenda 21. Brasília, 2002.

- Carneiro, M. C. S. M. (2011). Monitoramento das Dunas utilizando o Sistema de mapeamento a Laser (LIDAR) aerotransportável: Um Estudo a partir dos Movimentos das Dunas do Município Rio do Fogo – RN – Brasil. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Centro de Tecnologia e Geociências / Programa de Pós-Graduação em Geociência. Área de Concentração: Geologia Sedimentar e Ambiental. Recife, PE.
- Carneiro, M. C. S. M. (2003). Tecnologias da geoinformação no monitoramento da erosão costeira: um estudo a partir de Olinda. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Gestão e Políticas Ambientais, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE- Brasil.
- Carter, R. W.G. (1988). Coastal enviroment: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coast line. Academic Press, London.
- Castro, J.W.A. (2001). Geomorfologia do sistema sedimentar eólico de Paracuru, Ceará. Tese (Doutorado em Geomorfologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Castro, J.W.A. (2004). Transporte de sedimentos e migração de dunas sobre o promotório de Paracuru: litoral setentrional do Nordeste brasileiro. Boletim do Museu Nacional, Nova série. Geologia, 72. Rio de Janeiro, Brasil, 617 p.
- Castro, J.W.A. y Alheiros, M. M. (1994). Diagnóstico de risco de erosão na praia de Boa Viagem, Recife, PE. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38., Camburiú. Atas... SBG, Camburiú, 1: 505-508.
- Cunha, E, M. S. (2004). Evolução atual do litoral de Natal – RN (Brasil) e suas aplicações à gestão integrada. Tese de Doutorado. Universitat de Barcelona, Programa de Doctorado de Ciencias del Mar, Departament d'Ecologia, Departament d'Estratigrafia y Paleontologia. Barcelona, Espanha.
- Davidson-Arnott, R. G. D y Law, M. N. (1990). Seasonal patterns and control on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie. In: Nordstrom, K. F.; Psuty, N.P.E.; Psuty, N.P. e Carter, R.W.G. Coastal dunes: form and process. J. Wiley, Chichester, cap. 9: 177-200.
- Diniz, R. F. y Dominguez, J. M. L. (1999). Erosão costeira no litoral oriental do Rio Grande do Norte. Congresso da Abequa, 7. Porto Seguro-BA. Anais: CD-ROOM.
- Duarte, M. I. M. (1995). Mapeamento geológico e geofísico do litoral leste do Rio Grande do Norte: Grande Natal (Área I). Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, CCE/UFRN, Natal.
- Duarte, R. X. (2002). Caracterização morfo-sedimentológica e evolução de curto e médio-prazo das praias do Pina, Boa Viagem e Piedade, Recife/Jaboatão dos Guararapes-PE. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Fracasso, P. (2005). Sistemas de dunas do Parque das Dunas e Barreira do Inferno, Natal, RN: levantamento geológico/geofísico, elaboração do modelo determinístico e avaliação da vulnerabilidade/suscetibilidade frente às pressões antrópicas. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-Brasil.
- Giannini, P. C. F.. (2004). Geologia e geomorfologia do Quaternário costeiro do estado do Rio Grande do Norte. Geologia USP, São Paulo, 4(2), 1-12.
- Glennie, K. W. (1970). Desert sedimentary environments. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, Developments in Sedimentology, 14, 222 p.
- Goldsmith, V. (1978). Coastal dunes. In: Davis, R. A. (ed). Coastal sedimentary environments. New York: Springer-Verlag, 171-235.
- Gregório, M. N. (2009). Evolução da linha de costa e caracterização da plataforma continental interna adjacente à cidade do Recife – PE. Tese (Doutorado em) – CTG, Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (1993). Resolução No5, de 31 de março de 1993, que passou a complementar o capítulo II das especificações e normas para levantamentos geodésicos da R. PR-22/83, e que dispõe sobre Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar. Rio de Janeiro.
- Mabesoone, J. M. (1987). Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, e do seu embasamento: Relatório interno. UFPE, FINEP/PADCT, 66 p.

- Mabesoone, J. M., Silva, A. C. y Beurlen, K. (1972). Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geociências*, 2(3): 173-188.
- Maia, L. P. (1998). Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza NE-Brasil: implicaciones para una gestión costera ordenada. Tesis (Doctorado) Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, Barcelona.
- Manso, V. A. V., Coutinho, P. N., Guerra, N. C. y Soares Júnior, C. F. A. (2006). Pernambuco. In: Muehe, D. (org.), *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF: 179-196.
- McKee, E. D. (1983). Eolian sand bodies of the world. In: Brookfield, M. E. e Ahlbrandt, T. S. (eds.). *Eolian sediments and processes*. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, *Developments in Sedimentology*, 38: 1-25.
- Muehe, D. (org.) (2006). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- Muehe, D. (2005). Geomorfologia costeira. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. da (Org.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Muehe, D. (2001). O litoral brasileiro e sua compartimentação. In: Guerra, A. *Geomorfologia do Brasil*. 2.ed., Editora Bertrand do Brasil, Rio de Janeiro, 273-337p.
- Nordstrom, K. F. (2010). Recuperação de praias e dunas. Tradução Silvalves. (Oficina de Textos). São Paulo, Brasil, 263 p.
- Prefeitura do Recife. Emlurb, (2003a). Obras de proteção à praia de Boa Viagem: estudo de impacto ambiental - EIA, Prefeitura da Cidade do Recife, Secretaria de Serviço Público.
- Prefeitura do Recife. Emlurb (2003b). Obras de proteção à praia de Boa Viagem: relatório de impacto ambiental-RIMA, Prefeitura da Cidade do Recife, Secretaria de Serviço Público.
- Pye, K. e Tsoar, H. (1990). Aeolian bedforms. *Aeolian sand and sand dunes*. Cambridge University Press, London, 152-220.
- Reineck, H. E. y Sing, I. B. (1980). *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, New York, 549 p.
- Reutebuch, E. S.; McGaughey, R. J.; Andersen, H. & Carson, W. W., (2003). Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5): 527-535.
- Rivas, R. A. N. y Brito, J. L. N. S. (2003). A tecnologia laser scanning: uma alternativa para o mapeamento topográfico. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21., Belo Horizonte, MG. Anais... Disponível em: . Acesso em: 26 jan. 2010.
- Sherman, D. J. (1995). Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology*, 124, 339-349.
- Sherman, D. J. y Hotta, S. (1990). Aeolian sediment transport: theory and measurement. In: Nordstrom, K. F.; Psuty, N. P. e Carter, R. W. G. *Coastal dunes: form and process*. John Wiley. Chichester. cap. 2: p.17-37.
- Suguio, K., Barreto, A. M. F., Bezerra, F. H. R. (2001). Barra de Tabatinga and Touros Formations: evidence for pleistocene high sea level stillstands of the Rio Grande do Norte coast. *Pesquisa em Geociências*, Porto Alegre, 28, 5 - 12.
- Suguio, K. (1980). Rochas sedimentares: propriedades, gêneses, importância econômica. São Paulo, Editora Edgar Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo. 500p.
- Short, A. D. y Hesp, P. A. (1982). Wave beach and dune interactions in southeastern Australia. *Marine Geology*, 48: 259-284.
- Silva, E. A. de J. (2002). As dunas eólicas de Natal/RN: datação e evolução. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dissertação, 33 / PPGG. Natal- RN.

NOTAS

1. Aquisição de Dados (Gráficos e Textuais) 1.2 Coleta de dados (Bibliográficos, Imagens e Fotografias atuais e pretéritas) e planejamento de campo O estudo envolveu pesquisa e análise bibliográfica em diversos artigos e documentos científicos (Nacionais e Internacionais); vários trabalhos de campo na área da pesquisa; visitas e entrevista com pesquisadores de

diversos órgãos públicos: no Brasil, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 3.^a Divisão de Levantamento Comando do Exército em Olinda, IDEMA (Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do estado do Rio Grande do Norte), entre outros. A análise dos documentos cartográficos (cartas topográficas, fotografias aéreas, imagens de satélites, entre outros) atuais e pretéritos, subsidiou o planejamento do voo no que se refere ao georreferenciamento das poligonais da varredura laser.

2. Levantamento de campo O levantamento LIDAR aerotransportável e o pós-processamento dos dados necessitou de uma base GPS no local do mapeamento, representando assim a primeira etapa do levantamento. Nesta pesquisa foi definida e ocupada uma estação dentro da área de estudo. Nesse mapeamento a laser, um receptor GPS localizado no Sistema de Medição Inercial (SMI) registrou a posição da aeronave a intervalos fixos. Outro receptor baseado no solo (base GPS) forneceu a correção diferencial para a determinação de posição mais precisa. O DGPS (GPS Diferencial) é um método de refinamento dos dados posicionais derivados do rastreamento GPS por meio da correção de erros inerentes ao processo. Brandalize (2004) descreve como linha base o uso de dois aparelhos GPS que coletam informações da constelação GPS ao mesmo tempo. Nesse contexto, a linha base é a distância entre o aparelho localizado no solo e o aparelho aerotransportado. De acordo com recomendações do fabricante dos sistemas, a distância entre os aparelhos deve ser inferior a 50km. Outra recomendação é que as bases de solo também devem estar espaçadas em, no máximo, 50 km para garantia da precisão planimétrica dos pontos LASER. Sempre que tal condição não puder ser estabelecida, o uso de um conjunto de bases terrestres é requerido. Nos levantamentos terrestres, utilizaram-se equipamentos de GPS geodésicos de dupla frequência (L1 e L2) para leituras em sistema de pós-processamento e tempo real (RTK). No transporte de coordenadas, aplicou-se o método de levantamento GPS estático para as estações base GPS. A base GPS utilizada localiza-se no campo de dunas de Rio do Fogo, dentro do Parque Eólico de Rio do Fogo. Na seleção do local da base GPS, observaram-se as recomendações do fabricante e especificações da norma técnica (IBGE, 1993) quanto à obstrução do sinal GPS, ou seja, as observações GPS requerem a intervisibilidade entre a estação e os satélites.
3. Base Cartográfica 3.1 Planejamento e execução dos voos No voo, utilizou-se uma aeronave Cessna C180 equipada com Laser Aerotransportado Tecnologia LIDAR, denominado Airborn Laser Terrain Mapper (ALTM). O equipamento ALTM emitiu pontos sobre o terreno, encontrando resultados melhor que 1,6 m de equidistância média entre os pontos, para detalhar as principais feições de solo, vegetação, edificações entre outros. A frequência do aerolevantamento a laser foi de 19Hz. Para tanto, realizaram-se aerolevantamentos LIDAR em dois momentos: 8 de novembro de 2004 no período de verão. 3.2 Processamento e análise dos dados O pós-processamento realizou-se mediante um conjunto de programas e equipamentos para os dados coletados, chamados Dados Brutos (Raw Data). Os citados dados, referem-se as medidas LASER com os respectivos atributos, dados do GPS aerotransportado e dados da navegação inercial. Além dos dados do levantamento propriamente dito, no instante do processamento, incorporam-se os dados de calibração do sistema e parâmetros como excentricidade da antena GPS em relação ao sensor LASER; ângulos de montagem da plataforma do sensor LASER quando a aeronave está nivelada no solo; posição do sensor LASER em relação ao SMI. A precisão planialtimétrica alcançada foi num intervalo de 15 centímetros. 3.3 Levantamento das unidades morfoestruturais e delimitação das unidades geomorfológicas (análise e interpretações) Na elaboração da base de dados espaciais por meio da tecnologia de mapeamento a laser aerotransportado (LIDAR), realizou-se o voo pela Empresa Geoid Ltda, patrocinadora desta pesquisa. No levantamento a laser, captaram-se 100.000 pontos/segundos. Para tanto, foi necessária uma filtragem automática da nuvem de pontos LASER com o objetivo de separá-los em pontos que tocaram à superfície terrestre e os pontos que tocaram outros elementos (objetos). Essa filtragem realizou-se pelo programa TerraScan, que tem uma ferramenta específica para essa tarefa (classify – routine – ground). Essa etapa denomina-se filtragem dos pontos. A nuvem de pontos coletados em média, 5 pontos/m², definida na filtragem como não pertencente à superfície terrestre, foi separada por meio de planos de informações, ou seja, separando os principais elementos encontrados na área de estudo. Essa etapa se denomina classificação, e tem como objetivo principal auxiliar a encontrar pontos pertencentes à superfície terrestre. Os pontos selecionados como pertencentes ao solo foram utilizados na elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT). Os demais planos de informações classificados (vegetação, construção entre outras) foram usados para gerar Modelo Digital de Elevação (MDE). A classificação em MDT e MDE foi realizada por meio de algoritmos específicos; a acurácia desses modelos vincula-se fortemente ao algoritmo utilizado e ao percentual de pontos que retornam do solo. Estudos de Reutebuch et al. (2003) comprovam a acurácia de Modelos Digitais de Terreno em áreas até de vegetação densa. De posse dos dados, LIDAR, foi possível elaborar os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e individualizar os conjuntos geomorfológicos e suas morfologias associadas. Para isso, seguindo as recomendações da UGI para mapeamentos geomorfológicos de detalhe, utilizou-se a conservação e/ou dissecação das morfologias eólicas presentes na área como critério de classificação. Resultados e discussão Tendo como base o grau de conservação morfológica, foram identificados dois conjuntos morfológicos bem distintos, uma planície de acumulação eólica dunar e uma planície de acumulação eólica retrabalhada. Depósitos eólicos Na costa do Rio Grande do Norte estão presentes várias gerações de dunas, porém é bastante difícil determinar se elas se formaram por um ou vários episódios de formação. Entretanto, Maia (1998) cita que podem ser diferenciadas por uma série de variáveis: a forma, a diferença de coloração, tipo da vegetação e o grau de sedimentação. De acordo com Maia (1998), as relações

estratigráficas (Figura 5) diferenciam até três gerações de dunas, enquanto no litoral oeste do Ceará, identificou-se a quarta geração de dunas. Maia (1998) cita que a geração mais antiga, sem forma designada (paleodunas), encontra-se em contato direto com a Formação Barreiras. Essas paleodunas são formadas por areias quartzosas inconsolidadas, variando de bem a moderadamente selecionadas, com granulometria de fina a média. Enquanto a segunda geração de dunas consiste nas dunas parabólicas inativas, composta de areias quartzosas inconsolidadas, variando de bem a moderadamente selecionada, e granulometria de fina a média. Figura 5. Relações estratigráficas entre as gerações de dunas.

- 1 Dra. Pesquisadora do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Unidade Estadual de Pernambuco– e-mail: carmarciaibge@gmail.com
- 2 Prof. Dr. Pesquisador Professor UFAL/ IGDEMA–Universidade Federal de Alagoas / Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente – e-mail: brunge2005@gmail.com
- 3 Prof. Dra. Pesquisadora Professora ITEP/ PE–Instituto Tecnológico de Pernambuco/ Mestrado em Tecnologia Ambiental– e-mail: nevesgregorio@hotmail.com
- 4 Prof. Dr. Pesquisador Professor UNIFESP – Universidade Federal de São Paulo - Departamento de Ciências do Mar– e-mail: gilberto.unifesp@gmail.com
- 5 Pesquisador Governo do Estado de Pernambuco-Instituto Tecnológico de Pernambuco/ Mestrado de Tecnologia Ambiental – e-mail: dls.pessoal@gmail.com
- 6 Prof. Dr. Pesquisador Professor UFRN/ CERES–Universidade Federal do Rio Grande do Norte/ Departamento de Geografia do Centro de Ensino do Seridó – e-mail: srovital@gmail.com