



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Marcia Cristina de Souza Matos Carneiro

**MONITORAMENTO DAS DUNAS UTILIZANDO O SISTEMA DE MAPEAMENTO
A LASER (LIDAR) AEROTRANSPORTÁVEL:
UM ESTUDO DO CAMPO DE DUNAS DO MUNICÍPIO DE RIO DO FOGO
RN-BRASIL**

Tese de Doutorado
2011

MARCIA CRISTINA DE SOUZA MATOS CARNEIRO

Engenheira Cartógrafa, Universidade Federal de Pernambuco, 1984
Mestre, Universidade Federal de Pernambuco, 2003

**MONITORAMENTO DAS DUNAS UTILIZANDO O SISTEMA DE MAPEAMENTO
A LASER (LIDAR) AEROTRANSPORTÁVEL:
UM ESTUDO DO CAMPO DE DUNAS DO MUNICÍPIO DE RIO DO FOGO RN -
BRASIL**

Tese apresentada na Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pela Prof.^a Dra. Tereza Cristina Medeiros de Araújo, e coorientada pela Prof.^a Dra. Lucilene Antunes Correia Marques de Sá, como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Geociências, área de concentração Geologia Sedimentar e Ambiental.

RECIFE, PE
2011

C289m Carneiro, Marcia Cristina de Souza Matos.

Monitoramento das dunas utilizando o sistema de mapeamento a laser (lidar) aerotransportável: um estudo do campo de dunas do município de Rio do Fogo, RN, Brasil/ Márcia Cristina de Souza Matos Carneiro.– Recife: UFPE/ Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Geociências, 2011.

xviii, 132 f. : il.

Orientadora: Tereza Cristina Medeiros de Araújo

Tese (Doutorado) – UFPE/ Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Geociências, 2011.

1. Geologia – Rio do Fogo (Brasil, RN). 2. Geologia – Potiguar, Bacia (Brasil, RN). I. Araújo, Tereza Cristina Medeiros de. II. Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. III. Título. IV. Título: um estudo do campo de dunas do município de Rio do Fogo RN – Brasil.

CDU 551.7009813

“MONITORAMENTO DUNAS UTILIZANDO O SISTEMA DE MAPEAMENTO A LASER (LIDAR) AEROTRANSPORTÁVEL: UM ESTUDO DO CAMPO DE DUNAS DO MUNICÍPIO DO RIO DO FOGO – RN - BRASIL”.

Marcia Cristina de Souza Matos Carneiro

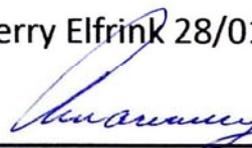
Aprovada:



Prof^ª. Dr^ª. Tereza Cristina Medeiros de Araújo
28/01/2011



Prof. Dr. Berry Elfrink 28/01/2011



Prof. Dr. Valdir do Amaral Vaz Manso 28/01/2011



Prof^ª. Dr^ª. Edvânia Torres Aguiar Gomes
28/01/2011



Prof^ª. Dr^ª. Maria do Carmo Martins Sobral
28/01/2011

Carolina e José Matos, pais muito amados; sem vocês, eu não existiria, e Maria Carolina e Pedro Henrique, filhos queridos, razão da minha vida, a vocês, dedico esta Tese.

“Feliz de quem atravessa a vida tendo mil razões
para ser viver.”

(Dom Helder Câmara)

AGRADECIMENTOS

A busca incessante pelo conhecimento, em todas as suas nuances, liga-nos uns aos outros. Por isso, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

A Deus, “Pai de amor infinito e de imensa misericórdia”.

Aos meus pais, Carolina e José Matos, o incentivo e dedicação em todos os momentos de crescimento; principalmente, por me terem ensinado o caminho da perseverança. Um especial agradecimento ao meu pai, que me acompanhou de perto e fez excelentes contribuições na construção da minha vida acadêmica e durante todo o caminho da minha vida.

A meus filhos, Carolina e Pedro, o novo sentido que deu a este caminho. Obrigado pela paciência e compreensão nos momentos de ausência.

A minha irmã Ana Claudia, o carinho e ajuda imprescindível, durante todo o processo de construção desta pesquisa.

A minhas irmãs Cecília e Andréa, por vocês existirem; e meus queridos e amados sobrinhos Daniel, Bruno, Júlia, Eduardo, Lucas e Alan, que tão bravamente me fizeram acreditar que na vida devemos sempre conjugar o verbo ACREDITAR E LUTAR, jamais desistir.

À Prof.^a Dra. Tereza Cristina Araújo, a orientação fornecida de fundamental importância para elaboração desta Tese. Agradeço imensamente suas leituras, correções e sugestões, especialmente por me haver aceitado como orientanda, o que me permitiu a realização de um grande sonho de retornar à UFPE.

À Prof.^a Dra. Lucilene Antunes Correia Marques de Sá, o carinho como acolheu o trabalho, a credibilidade depositada, assim como o apoio, as leituras, correções, críticas e sugestões, o que representou uma fundamental contribuição na minha formação e desenvolvimento deste estudo. Sempre disposta a discutir tanto minhas ideias, quanto minhas angústias; em quem encontrei não apenas uma orientadora, mas uma amiga. Admiro sua postura acadêmica e ofereço-lhe minha mais pura amizade.

Ao Dr. Mário Oscar de Souza Lima e à Empresa Geoid, o imenso apoio financeiro durante a realização dos voos LIDAR, assim como o processamento dos dados da pesquisa.

Sem esse apoio, jamais teria conseguido fazer esta tese de doutorado. Sou grata para sempre! Essa parceria maravilhosa me fez acreditar que nunca é tarde para a realização de um sonho.

Ao Prof. Dr. Josep Eliseu Pardo Pascual da Universidade Politécnic de Valencia (UPV), a generosidade de me orientar lendo, corrigindo e especialmente o incentivo incalculável, deixando claro em todos os momentos que eu estava na direção certa e trilhando o caminho de uma pesquisa inovadora e de grande contribuição acadêmica. Seu apoio imenso me deixou feliz e aliviou minhas angústias e inquietações.

À Prof.^a Dra. Edvânia Torres Aguiar Gomes, o estímulo, a amizade, generosidade e dedicação durante minha vida acadêmica. Merece imensa admiração sua dedicação sempre focada na construção de pessoas.

Aos Professores Virgínio H. de M. L. Neumann, Gorki Mariano, Valdir Manso, Lúcia Mafra Valença, Mário F. Lima Filho, Edilton dos Santos, João Adauto de Souza N., Alcina Magnólia F. Barreto, Margareth M. Alheiros, Gelson Luis Frambrini e a todos os professores que fazem a Pós-Graduação de Geociências os quais com tanta dedicação contribuíram sobremaneira na ampliação do meu conhecimento acadêmico.

Bruno Ferreira, amigo do Doutorado, que me ajudou em todos os momentos da tese, dando sempre boas contribuições e sugestões.

A todos do Grupo de Cartografía y Teledetección (CGAT) do Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría que me acolheram muito bem.

Ao Prof. Dr. Marcos Painho da Universidade Nova de Lisboa, Prof.^a Dra. Sue Nichols da Universidade New Brunswick e o Prof. José Miguel Arnal da Universidade Politécnic de Valencia, o imenso apoio durante estada em Portugal, Canadá e Espanha.

A Elizabeth Galindo, a amizade, dedicação, atenção e competência demonstrada na secretaria da Pós-Graduação de Geociências.

Cláudio David, meu amigo, muito querido, um obrigado especial à imensa colaboração em todos os aspectos da elaboração da pesquisa.

À geógrafa Terezinha Uchoa, amiga, uma fada encantada, obrigada por torcer por mim em toda a caminhada do meu doutorado.

Ao Prof. Msc. Adeildo Antão, meu eterno e querido professor, um especial obrigado à valiosa amizade.

Ao Prof. Dr. Paulo Nóbrega Coutinho, agradeço imensamente a leitura da tese, as orientações e os ensinamentos sobre a zona costeira do Nordeste brasileiro, e à imensa generosidade dos sábios.

À Eng.^a Dra. Silvane Karoline Silva Paixão, o apoio imensurável durante minha estada no Canadá.

Aos colegas Antônio Vicente Ferreira Júnior e Maria das Neves Gregório, colegas do Labogeo da UFPE, mil agradecimentos ao auxílio, contribuição e amizade durante todo o doutorado; com vocês passei momentos encantadores de amizade e apoio nos momentos mais difíceis e angustiantes.

Ao Dr. Berry Elfrink do Instituto DHI Water & Environment, a amizade, o apoio, as sugestões e orientações em todos os momentos da tese. Além disso, agradeço imensamente disponibilizar os dados de ondas da área da pesquisa.

Aos amigos queridos do IBGE Edilce Figueiredo Burity, Ericka D. Andrade, Kátia Duarte (*in memoriam*), Marival Ferreira, que sempre torceram por mim e estão sempre dispostos a me ajudar em tudo que estiver a seu alcance. Assim como Eliane Almeida Melo, João Rosendo, colegas de trabalho, o apoio manifestado no dia a dia.

Ao chefe da Unidade Estadual de Pernambuco do IBGE, Dr. Nilton Nadai, o melhor chefe do mundo, mil obrigados ao imenso apoio.

A Jainiton Pereira, Maria da Paz Melo, Graça Wanderley, Beth e Edméia, o apoio e a presteza na disponibilização das publicações do IBGE.

Aos amigos e colegas de doutorado, colegas de caminhada do doutorado e superespeciais; com vocês passei momentos encantadores de aprendizado e amizade.

Simone, Lígia, Luiza, Fátima, Silvana, Val, Ana Cristina, Ana Lúcia, Berenice, Soraia, Fernanda, Selma, Silvana, Rejane, Ângela e Sandra, minhas amigas irmãs de Coração.

Minhas queridas tias, que sempre torceram por mim: Dulcinéia, América, Argentina (*in memoriam*) e Ismênia (*in memoriam*).

Ao Programa Euro Brazilian Windows II, Erasmus Mundus External Cooperation Windows, agradeço imensamente a bolsa de doutorado durante seis meses na Europa, o que me permitiu realizar um sonho de adolescente e ter a certeza de que nunca é tarde para realizar um sonho.

Aos colegas do Laboratório de Engenharia Industrial da UPV, especialmente Mari Carnem, Anissa e José Luis, a amizade, o carinho e amor como me receberam na Espanha. Às instituições que colaboraram com o desenvolvimento deste projeto: Universidade Federal de Pernambuco; IBGE; 3.^a Divisão de Levantamento (3.^a DL) Comando do Exército em Olinda; a Fundação de Desenvolvimento do Estado de Pernambuco (Fidem); University of New Brunswick (UNB) - Department Geodesy Teachers & Geomatics Engineering of UNB; The Government of Canada Awards (GCA) and the Canadian Commonwealth Scholarship

Program (CCSP), The Graduate Students' Exchange Program (GSEP); Foreign Affairs and International Trade Canada (DFAIT), que fundou o GSEP; Canadian Bureau for International Education (CBIE), o órgão responsável pelas questões financeiras e administrativas; CARIS; Atlantic Learning Institute (ALI).

Àqueles que, de uma maneira ou outra, colaboraram na execução desta tese.

APRESENTAÇÃO

A Tese Monitoramento do Deslocamento das Dunas Utilizando o Sistema de Mapeamento a Laser (LIDAR) Aerotransportado: Estudo do Campo de Dunas do Município Rio do Fogo, RN, foi elaborada como um dos requisitos para cumprir exigências curriculares necessárias à obtenção do título de Doutor em Geociências do Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Área de Concentração Geologia Sedimentar e Ambiental. Esta pesquisa contou com o patrocínio da Empresa Geoid Ltda.

RESUMO

As dunas costeiras se destacam por atuar na proteção às transgressões do nível do mar e constituem ecossistemas de grande importância e vulnerabilidade às ações naturais e antrópicas, marcadas pelas interfaces de ambientes marinhos e costeiros, depósitos aquíferos, suporte vegetacional e planos de sustentação de diferentes formas de vida. Constata-se, desse modo, a relevância de preservar os campos de dunas. Em ações lentas e constantes, suas formas vão sendo alteradas necessitando de instrumentos de monitoramento que registrem da forma mais breve e antecipada esses processos. Diversos documentos cartográficos atuais e pretéritos são utilizados para o monitoramento; entre eles, destacam-se fotografias aéreas, imagens de satélites, mosaicos de Radar e cartas topográficas que permitem a visualização em duas dimensões. Nas últimas décadas, houve grande avanço tecnológico, tendo-se desenvolvido o mapeamento a laser aerotransportado – *Light Detection and Ranging* (LIDAR) –, sistema que captura dados tridimensionais da superfície da Terra por meio de procedimentos automatizados, que aliam precisão e acurácia com redução no tempo da captura e processamento dos dados. O estudo em desenvolvimento fundamentou-se nas Geociências e em Tecnologias da Geoinformação, visando fornecer subsídios à gestão integrada costeira. O objetivo da pesquisa é estudar a tendência de deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo, empregando a tecnologia LIDAR. Nesse sentido, esta pesquisa parte do pressuposto indissociável entre o conhecimento fornecido pelas Geociências e os meios tecnológicos disponibilizados pela Geoinformação para dar suporte às decisões acerca do diagnóstico, planejamento e gestão desses ecossistemas. Como área de estudo dessa dinâmica eólica, identificou-se e selecionou-se o campo de dunas no município de Rio do Fogo – RN, Brasil. A zona costeira do Rio Grande do Norte abrange parte das bacias sedimentares Pernambuco-Paraíba e a Potiguar, que pertencem ao conjunto de bacias mesocenoicas brasileiras que compõem a Província Costeira e a Margem Continental. Especialmente o campo de dunas, objeto deste estudo, é um espaço submetido a diferentes tipos de pressão desde o turismo predatório e a exploração mineral até a especulação imobiliária, intervenções urbanísticas e as próprias dinâmicas físicas naturais. Para o desenvolvimento da pesquisa, realizaram-se dois levantamentos aéreos com a tecnologia LIDAR. O primeiro em dezembro de 2001; o outro voo em novembro de 2004, utilizando-se uma aeronave Cessna C180. Esses voos foram controlados e apoiados, em campo, com *Global Position System* (GPS) geodésico de dupla frequência. Após o processamento dos dados do GPS e levantamento aéreo LIDAR, geraram-se o Modelo Digital do Terreno e o Modelo Digital de Elevação, resultando na confecção da base de dados espaciais, ou seja, dois mapas de monitoramento do deslocamento do campo de dunas; o primeiro na escala de 1:20.000 e o segundo na escala de 1:10.000 com *zoom* na escala de 1:2.000. Esses mapas possibilitaram a identificação da morfologia das dunas eólicas e uma avaliação centimétrica da evolução espaço-temporal do campo de dunas empregando técnicas de comparação entre diferentes recobrimentos aerofotogramétricos. Os estudos permitiram também a construção de mapa de uso e ocupação do solo; mapa geomorfológico em que se posicionou e identificou a Planície de Acumulação Eólica Dunar, que possibilitou a identificação das unidades morfológicas dos campos de dunas – parabólicas ativas e barcanoides dissipadas, parabólicas inativas e com morfologia dissipada e ainda lençóis de areia e terraços marinhos; também a elaboração de perfis. A análise dos documentos produzidos mostrou que as dunas tiveram uma migração horizontal no período de dois anos e onze meses, de 21,51 até 67,8 metros, e uma taxa de deslocamento anual variando de 7,36m/ano a 23,22 m/ano, enquanto que a taxa de deslocamento horizontal mensal variou num intervalo de 1,25m/mês a 1,83 m/mês; tendo o volume de sedimentos deslocados de 2001 a 2004 de 44.661.592,58 m³, no sentido predominante do vento SE-NW, ocorrendo, portanto, uma perfeita correlação entre os dados de deslocamento gerados e a direção dos ventos. A pesquisa discute os resultados alcançados e apresenta uma análise tridimensional e multitemporal da área de estudo. A mensuração de alterações na zona costeira pode ser executada mediante as Tecnologias da Geoinformação. No entanto, só com a integração das Geociências, torna-se possível caracterizar e avaliar as mudanças ambientais direcionadas ao desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Dunas, LIDAR aerotransportado, Rio do Fogo-RN-Brasil, Monitoramento temporal.

ABSTRACT

The coastal dunes are noted for their work in the protection of sea level transgressions and for composing ecosystems of great importance and vulnerability to natural and anthropogenic activities, marked by the marine and coastal interfaces, aquifers deposits, vegetation support and plans to support different life forms. There is thus the importance of preserving the dune fields. In slow and steady actions, their forms are being modified in the needs of monitoring instruments that record as briefly and as advanced these processes. Several current and older cartographic documents are used to monitor, among them stand out the aerial photographs, satellite images, radar mosaics and topographical maps that allow the visualization in two dimensions. In recent decades there has been a major technological breakthrough by being developed the airborne laser mapping - Light Detection and Ranging (LIDAR) system to capture three-dimensional Earth's surface data through automated procedures, which combine precision and accuracy with capture time reduced and data processing. The ongoing study was based on Geoscience and Geoinformation Technologies, to provide data to integrated coastal management. The research aims are to study the Rio do Fogo dunes field displacement trend, using the LIDAR technology. Consequently, this research assumes inseparable from the knowledge provided by the Geosciences and the technological means available for Geoinformation to support decisions about the diagnosis, planning and management of these ecosystems as study area of this dynamic wind, we identified and selected the dune field in the municipality of Rio do Fogo - RN, Brazil. The coastal zone of Rio Grande do Norte covers part of the sedimentary basins Pernambuco-Paraíba and Rio Grande do Norte, which belong to the Brazilian mesocenozoical basins set that make up the Coastal Province and Continental Margin. Especially the dune field, the object of this study is an area subjected to different pressures from tourism and mineral exploration by predatory land speculation, urban interventions and their own natural physical dynamics. For the development of the research, there were two aerial surveys with LIDAR technology. The first in December 2001, the other flight in November 2004, using Cessna C180 aircraft. These flights were managed and supported in the field with Global Position System (GPS) geodetic dual frequency. After GPS data processing and LIDAR aerial survey, it was generated the Digital Terrain Model and Digital Elevation Model, resulting in the production of spatial database, in other words, two maps tracking the displacement of the dune field, the first in the scale of 1:20.000 and the second one in the range of 1:10.000 and zoom scale of 1:2000. These maps allowed the morphological identification of the wind dunes and a centimeter assessment of space-time evolution of the dune field employing techniques of comparison between different aerophotogrammetric coatings. The studies also allowed the construction of: use map and land use geomorphological map that is positioned and identified the Wind Dune Accumulation Plain, which permitted the identification of morphological units of the dune fields – active parabolic and dispelled barcanoides, and inactive parabolic morphology has dissipated and sand sheets and marine terraces; also the profiles development. The documents analysis produced showed that the dunes had a horizontal migration in the period of two years and eleven months, up 43.8 to 64.1 meters and an annual rate of displacement ranging from 7.36 m / year to 23.22 m / year, while the horizontal displacement monthly rate varied in the range of 1.25 m / month to 1.83 m / month, with the sediment volume displaced from 2001 to 2004 of 44,661,592.58m³ in the prevailing wind sense SE-NW, leading thus, a perfect correlation between the generated displacement data and wind direction. The research discusses the results and presents an analysis of three-dimensional and multi-temporal study area. The measurement of changes in the coastal zone can be performed by the Geoinformation Technologies. However, only with the Geosciences integration becomes possible to characterize and assess environmental changes aimed at sustainable development.

Keywords: Dunes, airborne LIDAR, Rio do Fogo-RN-Brazil, Temporal Monitoring.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
APRESENTAÇÃO	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
SUMÁRIO	xii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE QUADROS	xviii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xix
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA, ELABORAÇÃO DA HIPÓTESE E JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.2.1 Objetivo geral	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 ESTRUTURA DA TESE	7
CAPÍTULO II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	8
2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	8
2.1.1 Praias de Riodo Fogo e Zumbi	8
2.2 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS.....	13
2.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	13
2.3.1 Geologia	13
2.3.2 Sedimentologia	15
2.3.3 Clima	17
2.3.3.1 Pressão, temperatura, umidade relativa do ar, insolação e insalubridade.....	17
2.3.3.2 Precipitação	18
2.3.3.3 Ventos	19
CAPÍTULO III – EMBASAMENTO TEÓRICO	25
3.1 GEOLOGIA REGIONAL	25
3.1.1 Bacia Potiguar	25

3.2	AMBIENTE COSTEIRO – DUNAS	29
3.2.1	Depósitos eólicos	37
3.2.2	Ondas	39
3.2.3.3	Condições de ondas no litoral de Rio do Fogo	40
3.2.3	Correntes	44
3.2.4	Marés	44
3.2.4	Interação entre fluxos costeiros	45
3.3	SISTEMA DE MAPEAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO LIGH DETECTION AND RANGING (LIDAR).....	47
3.3.1	Fontes de erro	53
3.3.3	Custo x tempo	54
3.3.3	Aplicação	58
3.3.4	Meio ambiente	58
3.3.5	Mapeamento topográfico	60
3.3.6	Processamento de imagens	62
3.4	GESTÃO COSTEIRA E MONITORAMENTO CARTOGRÁFICO	64
	CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS.....	68
4.1	PLANEJAMENTO E LEVANTAMENTO DE DADOS	69
4.1.1	Coleta de dados e planejamento de campo	69
4.1.2	Levantamento de campo	70
4.1.3	Planejamento de voo	72
4.2	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	73
4.2.1	Transformação de coordenadas	76
4.3	GERAÇÃO E ANÁLISE DOS MAPAS TEMÁTICOS	77
	CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.1	EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO CAMPO DE DUNAS COM COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES RECOBRIMENTOS AEROFOTOGRAFAMÉTRICOS	80
5.2	DESLOCAMENTO DO CAMPO DE DUNAS DE RIO DO FOGO	84
5.3	MAPA DE USO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO	95
5.4	MAPA GEOMORFOLÓGICO	98
5.5	DISCUSSÃO	100
	CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	107
	REFERÊNCIAS	112

ANEXO A – Mapa do monitoramento de deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo Escala: 1/20.000	124
ANEXO B – Mapa do monitoramento de deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo Escala: 1/10.000	125
ANEXO C – Resolução Conama n.º 341/03	126
ANEXO D – Fotografias de dunas no Canadá	129
ANEXO E – Relatório da Estação Geodésica SAT 92356	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Histórico dos aspectos fisiográficos no período 1984-2004 na Grande Natal	18
Tabela 3.1	Estatística anual de ondas próximas à costa: altura x direção de onda	43
Tabela 3.2	Estatística anual de ondas próximas à costa: período x direção de onda	43
Tabela 3.3	Precisões, Resoluções e Custo da aquisição de um MTD por km ² por fotogrametria, Imagens de satélites, topografia e LIDAR	55
Tabela 5.1	Coordenadas <i>Universal Transverse Mercator</i> (UTM), altitude, formas, deslocamento e velocidade do campo de dunas de Rio do Fogo em dez pontos distintos	92
Tabela 5.2	Classes x área em km ² x porcentagem da área total (%)	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de localização do município de Rio do Fogo, RN, Brasil	9
Figura 2.2	Fotografias do litoral do município de Rio do Fogo	11
Figura 2.3	Fotografias do campo de dunas de Rio do Fogo em 2004	12
Figura 2.4	Mapa geológico do município de Rio do Fogo	14
Figura 2.5	Gráfico representativo da porcentagem granulométrica obtida em 100 g de cada amostra coletada adjacente aos coletores	16
Figura 2.6	Atlas eólico do Nordeste do Brasil	21
Figura 2.7	Esquema de efeitos de diferentes fatores locais	22
Figura 2.8	Dados de velocidade e direção dos ventos nos últimos trinta anos	23
Figura 2.9	Direção predominante dos ventos ao longo da costa norte do Estado do RN	24
Figura 3.1	Mapa de localização da Bacia Potiguar	26
Figura 3.2	Carta cronoestratigráfica da Bacia Potiguar: geocronologia, ambiente deposicional, discordância e litoestratigrafia	27
Figura 3.3	Carta estratigráfica da Bacia Potiguar: seção colunar, tectônica e magmatismo	28
Figura 3.4	Distribuição dos maiores campos de dunas costeiras do mundo	30
Figura 3.5	Esquema do movimento dos sedimentos eólicos sobre a forma de dunas	31
Figura 3.6	Fotografia aérea do campo de duna no município de Rio do Fogo	34
Figura 3.7	Dunas barcanas	35
Figura 3.8	Mapa geológico do quaternário costeiro do Rio Grande Norte	37
Figura 3.9	Relações estratigráficas entre as gerações de dunas	38
Figura 3.10	Energia x altura significativa de onda	41
Figura 3.11	Gráfico representativo da energia x período de onda	41
Figura 3.12	Gráfico representativo da energia x direção média de onda	42
Figura 3.13	Rosa anual de ondas na profundidade de 20 metros	42
Figura 3.14	Sistema LIDAR	49
Figura 3.15	Seleção de retornos LIDAR	50
Figura 3.16	Mapa de áreas da cidade de Fredericton com risco de inundação em uma simulação com o nível do Rio St. John atingindo 8,5 metros	59
Figura 3.17	Modelo digital do terreno na superfície sul da praia 1997-2000	61
Figura 3.18	Mapeamento da área de interface terra-mar, Praia de Piedade, Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco	62
Figura 3.19	Aplicação na classificação de edificações, vegetação e terreno	63
Figura 3.20	Modelo digital de um recorte do bairro de São José, Recife, PE, Brasil	63

Figura 4.1	Esquema da metodologia da pesquisa	68
Figura 4.2	Exemplos de documentos cartográficos analisados para subsidiar o mapeamento e o georreferenciamento para criação de poligonais	69
Figura 4.3	Monografia da base Rio do Fogo	71
Figura 4.4	Exemplo do software utilizado para elaboração do plano de voo	72
Figura 4.5	Fotografia da aeronave utilizada nos aerolevantamentos a laser, avião Cessna C180	73
Figura 4.6	Fluxograma de processamento	74
Figura 4.7	Pós-processamento em laboratório do voo e da leitura GPS de base.	75
Figura 5.1	Fotografias aéreas de 1969 e 2005 ilustrando as alterações na área de estudo, especialmente do campo de dunas de Rio do Fogo, em um período de trinta e seis anos	82
Figura 5.2	Ilustra a Fotografia da Vila de Zumbi em 2004	83
Figura 5.3	Fotografia da vegetação da área de estudo, janeiro 2004	83
Figura 5.4	Mapa de evolução do campo de dunas: migração horizontal das dunas na escala de 1:20.000 – mapa no Anexo A	85
Figura 5.5	Mapa de evolução do campo de dunas: migração horizontal das dunas na escala de 1:10.000 – mapa no Anexo B	86
Figura 5.6	Perfil da migração horizontal das dunas	87
Figura 5.7	Perfil 1 no sentido NO-SE do campo de dunas móveis de Rio do Fogo	88
Figura 5.8	Perfil 2 no sentido NE-SO do campo de dunas móveis de Rio do Fogo	89
Figura 5.9	Duna parabólica posicionada seis pontos distintos na escala 1:10.000 do recorte do mapa de deslocamento do campo de dunas (Anexo B)	90
Figura 5.10	Duna barcanoide posicionada seis pontos distintos na escala 1:10.000 do recorte do mapa de deslocamento do campo de dunas (Anexo B)	91
Figura 5.11	Modelo digital do terreno (MTD) do campo de dunas móveis de Rio do Fogo	94
Figura 5.12	Mapa de uso do solo da área de estudo	96
Figura 5.13	Mapa geomorfológico	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Divisão e classificação de gerações ou sistemas de dunas para a região de Natal/RN segundo proposta de diversos autores	33
Quadro 3.2	Mapeamento a laser aerotransportado x aerofotogrametria x IFSAR	51
Quadro 3.3	Principais fontes de erros no sistema LIDAR	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
AOL	<i>Airborne Oceanographic LIDAR</i>
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
CONDEPE	Instituto de Planejamento de Pernambuco
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
GERCO	Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDEMA	Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDH-M	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IFSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LRF	<i>Laser Rangefinder</i>
MOLA	<i>Mars Observer Laser Altimeter</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfico
PIB	Produto Interno Bruto
PNGC	Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RN	Rio Grande do Norte
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A zona costeira é um dos espaços mais dinâmicos do planeta e de grande valor ambiental. Desempenha um papel importante socioeconômico na configuração de enorme fonte de recursos (Manso *et al.*, 2006). O espaço costeiro é modelado e remodelado em escalas temporais tendo como resultado o balanço de sedimentos, as alterações climáticas e variação do nível do mar, que se relaciona também com a dinâmica costeira e aliado às atividades e intervenções antrópicas (represamento de rios, dragagem, obras de engenharia, entre outras). Situada na faixa em contato da terra com o mar, é uma região de intensa energia e caracteriza-se 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 nesse ambiente é alterado, seja por ocupação das dunas, construção de edificações, seja pela destruição da vegetação nativa das dunas, ocorre um desequilíbrio do balanço sedimentar e, por conseguinte, da estabilidade da linha de costa, tornando esse ambiente vulnerável à ação da erosão costeira (Muehe, 2001).

O litoral potiguar abrange parte das bacias sedimentares Pernambuco-Paraíba e a Potiguar, que pertencem ao conjunto de bacias mesocenoicas brasileiras que compõem a Província Costeira e a Margem Continental. Essas bacias têm origem relacionada com eventos geotectônicos que determinaram, a partir do Jurássico, a abertura do Oceano Atlântico, e apresentam-se preenchidas por uma sedimentação mesocenoica, em que os sedimentos quaternários compreendem importantes depósitos 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 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 (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. As praias são arenosas, apresentam diversas enseadas. 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 do estado (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, a salinização do solo, a destruição de infraestruturas humanas e a abrasão marítima nas falésias. Constata-se, assim, a relevância de preservar os campos de dunas (Carter, 1988).

As acumulações de origem 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 em todo o mundo é a ocupação antrópica das dunas, que desencadeia o processo de erosão costeira. No Brasil, encontram-se diversas praias experimentando o processo de erosão, requerendo medidas de recuperação ou contenção (Castro & Alheiros, 1994; Duarte, 2002; Carneiro, 2003; Prefeitura do Recife, 2003a; Prefeitura do Recife, 2003b; 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, e os conhecimentos adquiridos têm sido pouco incorporados. Além disso, são ainda incipientes as diretrizes e ações do poder público em lidar com o problema e as causas.

Nas últimas décadas, em todos os ramos da ciência, houve um grande avanço tecnológico, e o mapeamento a laser – Light Detection and Ranging (LIDAR) – destaca-se como uma nova tecnologia de captura de dados da superfície física da Terra. Os dados levantados pelo sistema LIDAR permite a automatização de procedimento de mapeamento, aliada à alta precisão, acurácia, densidade de pontos tridimensionais, a alta velocidade de execução, voo abaixo das nuvens, arquivos separados por planos de informação – *layers* (solo, vegetação, edificações) entre outros.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA, ELABORAÇÃO DA HIPÓTESE E JUSTIFICATIVA

Um dos maiores desafios do século XXI de todas as zonas costeiras está em compatibilizar o crescimento econômico com a preservação ambiental. Segundo Dias *et al.* (2009), fatores como a intensificação da ocupação antrópica à beira-mar, a ampliação e a diversificação das áreas industriais, atividades antrópicas ao longo das bacias hidrográficas, as intervenções de defesa costeira, o grande crescimento da vocação turística, as alterações climáticas em curso e a elevação do nível médio do mar, entre outras, vêm pressionando o litoral, que é uma área de grande fragilidade ambiental.

A especulação imobiliária e, conseqüentemente, os grandes investimentos exercem uma imensa pressão na ocupação da zona costeira segundo Nordstrom & Mauriello (2001). Os problemas acarretados com a alteração da paisagem costeira, pela ocupação antrópica das dunas, incluem: a perda de *habitat* e diversidade biológica (Beatley, 1991); erosão costeira (Castro & Alheiros, 1994; Duarte, 2002; Carneiro, 2003; Prefeitura do Recife, 2003a; 2003b; Manso *et al.*, 2006; Gregório, 2009); de dunas (Nordstrom *et al.*, 2002); alteração da paisagem (Berlanga-Robles & Ruiz-Luna, 2002); aumento no número de espécies ameaçadas de extinção (Melvin *et al.*, 1991); extinção de espécie de plantas nativas; perda de valores estéticos e recreativos (Cruz, 1996) e do patrimônio ou aspecto natural do litoral, o que resulta em problemas ambientais, comprometendo a capacidade de gestão ambiental sustentável (Nordstrom, 2010).

De acordo com Fisher (1989), a erosão costeira destrói a infraestrutura e as edificações localizadas à beira-mar em diversas áreas do planeta. A reconstrução após esse evento muitas vezes representa um impacto ambiental ainda maior principalmente da paisagem. Conseqüentemente observa-se que algumas obras de proteção costeira apresentam alterações danosas no ambiente praia, tendo como resultado a modificação no deslocamento dos sedimentos e na característica ambiental preexistente.

Diversas pesquisas em ambiente de praias e dunas, como a de Nordstrom (2010), ressaltam o potencial de recuperação desse ambiente para compensar perdas ambientais em outra parte. Assim como a importância de restabelecer a valorização pelos componentes da dinâmica natural das praias, dos perfis praias, da vegetação nativa, a conservação das praias e das dunas costeiras.

Atualmente o interesse pelo desenvolvimento de uma nova relação sustentável da sociedade com a natureza no sentido de minimizar as perdas ambientais e a criação de unidades de conservação costeiras, tais como parques nacionais, estaduais e municipais, ajudam a manter o patrimônio ambiental.

Para uma gestão harmônica das zonas costeiras, os gestores públicos, segundo Dias *et al.* (2009), devem considerar que os ecossistemas costeiros são: (i) únicos, e não recuperáveis à escala humana; (ii) intensamente dinâmicos, e a manutenção dessa dinâmica é fundamental para a preservação das suas potencialidades; (iii) densamente utilizados pelo homem em diversas atividades relacionadas com os transportes, os recursos alimentares, a indústria, a produção de energia, recursos minerais e atividades de lazer, entre outras; (iv) em alguns locais do litoral do planeta, zonas de alto risco ambiental, no que se refere à ação dos temporais, a maremotos, ocorrência de *tsunamis*, à erosão costeira e à elevação do nível médio do mar; (v) ambientes receptores de grandes massas de água dos rios, riachos entre outras origens; (vi) ambientes afetados por derrames de hidrocarbonetos (e outras substâncias poluentes) acidentais ou provocados entre outros.

A importância da preservação das dunas costeiras, segundo Nordstrom (2000), deve-se a diversas questões ambientais; entre elas, destacam-se os importantes *habitats* ecológicos com diversas espécies endêmicas de fauna e flora, representando ambientes costeiros de grande relevância ambiental, tanto para uso recreativo e contemplativo quanto por abrigarem sítios geológicos, paleontológicos e arqueológicos (sambaquis), presença de recursos minerais, como areia, água, minerais pesados (ilmenita, rutilo, magnetita, zircão, minerais pesados), entre outros.

As dunas exercem funções ambientais relevantes, tais como: (i) proteger áreas costeiras (marismas, mangues, cursos d'água e zonas urbanas) contra os efeitos de marés altas, ventos e invasão de areia; (ii) representar depósitos de areia para substituir a areia erodida por ondas ou levadas por tempestades; estabilizar, em longo prazo, a frente da praia; (iii) exercer uma barreira contra a penetração de água salgada no nível freático, mediante a pressão de água doce que armazenam (lençol freático); (iv) desenvolver pesquisa científica, pois se refere a constituir um laboratório natural de ensino, de grande relevância ecológica; (v) ter beleza

paisagística e atribuir identidade ao local; (vi) ser local de pouso de aves migratórias e de alimento e refúgio para a fauna estuarina; e, (vii) permitir o ecoturismo (Carter, 1988; Conama, 2003; Nordstrom, 2010).

Segundo Seeliger *et al.* (2000), a água doce oriunda das dunas é um recurso mineral relevante para sustentabilidade de diversas comunidades costeiras, assim como para o desenvolvimento da vegetação local, a qual participa efetivamente do processo natural de fixação das areias inconsolidadas presentes nas dunas. As mudanças no nível do lençol freático, na maioria das vezes, introduzem processos abióticos e biológicos com efeitos de longo prazo sobre o ambiente dunar, *habitat* e características da vegetação.

Segundo Carter (1988), de todos os ecossistemas costeiros, as dunas sofrem maior grau de degradação antrópica. Aliados à grande intervenção humana sofrida nesse ambiente, apenas nos últimos trinta anos, iniciaram-se estudos integrados à gestão costeira.

O litoral do Rio Grande do Norte, especialmente por sua beleza paisagística, de praias arenosas com presença de dunas, falésias, lagoas e estuários, vem atraindo diversas atividades comerciais e turísticas nacionais e internacionais. O quadro atual do litoral potiguar, principalmente da divisa do estado da Paraíba até a Praia de Genipabu, é de uma imensa presença de turistas, e para atender e satisfazer a essa demanda, diversas atividades são criadas e desenvolvidas, modificando expressivamente a paisagem, notadamente pela grande especulação imobiliária (Carvalho, 2009).

Esse cenário transforma-se entre a Praia de Genipabu e a de Touros, com poucos turistas potiguares veranistas e alguns estrangeiros, sem nenhuma infraestrutura turística, tampouco atividades agrícolas e de pecuária de grande expressão. Contudo, diversos estudos de cenários futuros apontam para a intensa especulação imobiliária, especialmente a construção de grandes *resorts* (Carvalho, 2009).

Aliado a isso, sobre essa porção litorânea, encontram-se poucos estudos e pesquisas direcionados à dinâmica desse ambiente, o que compromete a gestão costeira sustentável. A escolha da área de estudo se deve, entre outros motivos, ao desafio do aprimoramento de boas práticas e formas de utilização e ocupação, fornecendo embasamento científico para decisões legais de controle, proteção, preservação e recuperação ambiental, utilização de tecnologia inovadora que possibilita a geração de base cartográfica de alta precisão para estudos de mudança climática, entre outras.

Esta pesquisa visa gerar dados científicos para subsidiar ações preventivas do turismo predatório e controlar as pressões de ocupação e mau uso do seu entorno. O monitoramento de áreas com essa característica ambiental tem importância fundamental para controlar as

ações antrópicas no meio ambiente local e no seu entorno, atendendo, desse modo, às necessidades da população direcionadas ao desenvolvimento sustentável de áreas de grande fragilidade ambiental.

A proposta do estudo surgiu também incentivada pelos desafios detectados e relatados no Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), instituído pela Lei n.º 7.661, de 16 de maio de 1988 (Brasil, 1988a), que vem sendo desenvolvido pelo Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro (Gerco). No PNGC e a Avaliação e Ações Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade da Zona Costeira e Marinha (Idema, 2002) recomendam pesquisas e estudos com tecnologias inovadoras, com o interesse de contribuir para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias, cujo enfoque científico contribuirá para a sobrevivência humana tanto na autorrealização social (lazer) como econômica (fontes alternativas de energia e turismo).

A questão levantada na pesquisa é: o mapeamento a laser aerotransportado é uma tecnologia adequada para constatar, quantificar e monitorar o deslocamento das dunas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental costeira?

A hipótese da pesquisa foi formulada por meio da questão: É possível identificar, quantificar e monitorar a tendência do deslocamento das dunas utilizando mapeamento a laser aerotransportado?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Determinar o deslocamento do campo de dunas empregando tecnologia de mapeamento a laser aerotransportado – Light Detection and Ranging (LIDAR) – no município de Rio do Fogo, Rio Grande do Norte, Brasil, para subsidiar o planejamento sustentável costeiro.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Elaborar a base de dados espaciais empregando a tecnologia de mapeamento a laser aerotransportado (LIDAR);

- b) Avaliar a evolução espaço-temporal e identificar a dinâmica das feições eólicas do campo de dunas por meio da comparação entre diferentes recobrimentos aerofotogramétricos;
- c) Gerar mapa de uso do solo da área da pesquisa;
- d) Gerar mapa geomorfológico da área da pesquisa;
- e) Calcular o volume de sedimentos deslocados de 2001 – 2004; e
- f) Fornecer dados espaciais para subsidiar a Gestão Costeira.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta etapa consiste na estruturação da tese que se deu em fases distintas relatadas a seguir.

Inicia-se com a descrição da introdução, em que se formulou o problema; justifica-se a relevância da pesquisa, apresentam-se os objetivos (geral e específicos) e a hipótese. No segundo capítulo, situa-se a área da pesquisa. No terceiro capítulo, expõe-se a revisão bibliográfica e o embasamento teórico acerca da Geologia, dos ambientes costeiros, sistema de varredura LIDAR, da área de estudo e da gestão costeira e monitoramento. No quarto capítulo, relata-se a metodologia da área da pesquisa e os equipamentos e softwares que se utilizam neste estudo. No quinto capítulo, descrevem-se os resultados da pesquisa e as discussões. No último momento do estudo, descrevem-se as principais conclusões e recomendações, finalizando-se com as referências bibliográficas e anexos.

CAPÍTULO II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo localiza-se no campo de dunas do município de Rio do Fogo. Esse município situa-se no litoral do estado do Rio Grande do Norte, na região Nordeste do Brasil. Apresenta uma extensão territorial de 151,2 km², distando 61,1 km de Natal, capital do estado. Tem uma população estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008) de 10.048 habitantes e densidade demográfica de 6,5 hab./km². A sede do município localiza-se nas coordenadas geográficas de latitude 05^o16'22" S e longitude 35^o22'59" 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 2.1.

2.1.1 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 selecionada localiza-se no município de Rio do Fogo, conforme ilustra a Figura 2.1 (área em cinza). Começa na foz do Rio Punaú no Oceano Atlântico, desce pelo rio até a ponte da BR-101; segue pela RN-021 até a praia de Rio do Fogo, seguindo pela praia, chega-se à foz do Rio Punaú, marco inicial da descrição desse perímetro, uma área de aproximadamente 35,77 km² enquanto 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. O litoral se forma por “praia reflectiva” segundo Muehe (2006, p. 168) e praias dissipativas – praias próximas à desembocadura do Rio Punaú – (Figura 2.2), constituído de: (i) praias arenosas com dunas frontais (A) conhecida como Praia do Zumbi; (ii) praia com falésias vivas cobertas por campo de dunas parabólicas, barcanas e barcanoides (B) denominada Praia de Rio do Fogo; (iii) e na plataforma interna, segundo Santos *et al.* (2007), há presença de recifes de arenito (*beachrocks*) que são paralelos à linha de costa e alteram o padrão de arrebentação das ondas.

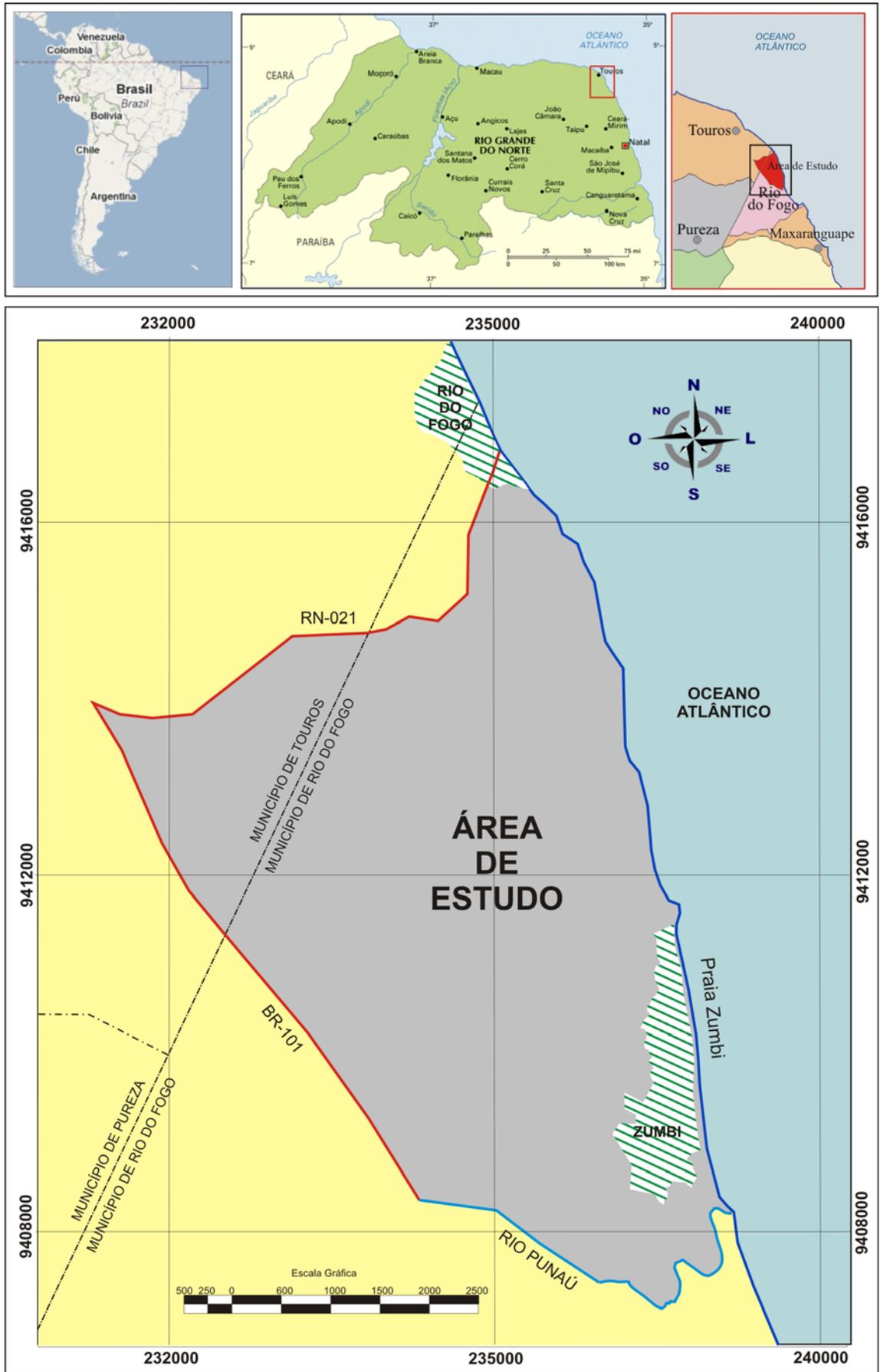


Figura 2.1 – Mapa de localização do município de Rio do Fogo, RN, Brasil

Geomorfologicamente, a zona costeira é formada por: planícies, tabuleiros costeiros, e os campos de dunas são os elementos de relevo predominantes em toda a costa; com planícies fluviais localizadas nas desembocaduras dos riachos e rios, onde se destaca o Rio Punaú conforme ilustra fotografias na Figura 2.2 (C).

Na Praia do Zumbi, as variações morfodinâmicas refletem mudanças na topografia da praia tridimensional que interferem no comportamento do fluxo aerodinâmico sobre o pós-praia e no potencial de deriva eólica (Short & Hesp, 1982; Davidson-Arnott & 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.

No Rio Punaú, o aporte de areias fluviais pode ser mais intensificado sazonalmente nos períodos climáticos de maior precipitação pluviométrica, e 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 litoral, principalmente na direção sul para norte (Diniz & Dominguez, 1999). Na Figura 2.3, apresentam-se fotografias de 2004 do campo de dunas de Rio do Fogo.

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 & Hotta, 1990).



Figura. 2.2 Fotografias do litoral do município de Rio do Fogo que apresentam : (A) falésias, cordões litorâneos estreitos e presença de turfa; (B) praias arenosas com presença de dunas frontais e (C) desembocadura do Rio Punaú.

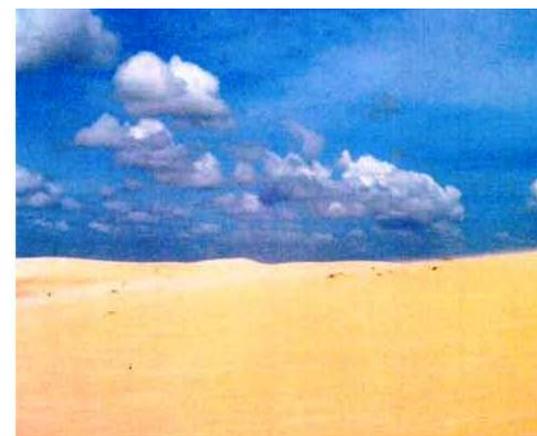
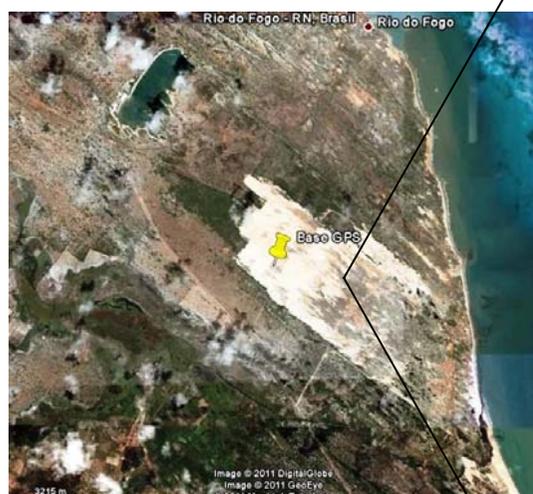


Figura.2.3 – Fotografias do campo de dunas móveis de Rio do Fogo em 2004. Observa-se detalhe da marca de ondas

2.2 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

Os setores econômicos mais representativos da zona costeira do Rio Grande do Norte são o comércio, a indústria e os serviços. As indústrias de maior destaque nesse litoral são: pesca, produtos alimentares, canavieira e de mineração. As atividades agrícolas temporárias de maior relevância no litoral oriental são as culturas do melão. Nas culturas permanentes, destacam-se a castanha de caju, o coco-da-baía, a manga e a banana (Marcelino, 1999).

Nesse litoral oriental, a atividade pesqueira artesanal costeira e estuarina tem sua grande importância econômica para a população local não só pelo volume da produção, mas pela variedade e qualidade das espécies, com destaque para uma fauna com alta diversidade composta por tainha, pescadas, camurins, polvo, camarões, lagosta, entre outros (Marcelino, 1999)

Rio de Fogo tem sua economia baseada nas atividades de comércio, pesca e agrícola, com destaque para as culturas da banana, jerimum, coco e caju. O artesanato local são os bordados de renda e labirinto. O turismo também é uma atividade de destaque motivada pelas belas praias: Rio de Fogo, Barra de Punaú e Zumbi. O ecoturismo tem seus atrativos como os mangues, parrachos, lagoas, dunas e o Morro do Urubu.

Segundo a regionalização utilizada pelo IBGE no estado, município de Rio do Fogo encontra-se na mesorregião leste potiguar e na microrregião litoral nordeste. Tem uma população estimada de 10.048 habitantes e densidade demográfica de 6,5 hab./km² (IBGE, 2008). Em 2000, o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) de Rio do Fogo foi 0,598 de acordo com o Atlas de Desenvolvimento Humano (PNUD/ IPEA, 2000).

Segundo a classificação do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o município está entre as regiões consideradas de médio índice de desenvolvimento humano (IDH), com 0,5 e 0,8. Em relação aos outros municípios do Brasil, Rio do Fogo apresenta uma situação ruim: ocupa a 4.687.^a posição, ou seja, 4.686 municípios (85,1%) estão em situação melhor e 820 municípios (14,9%) estão em situação pior ou igual.

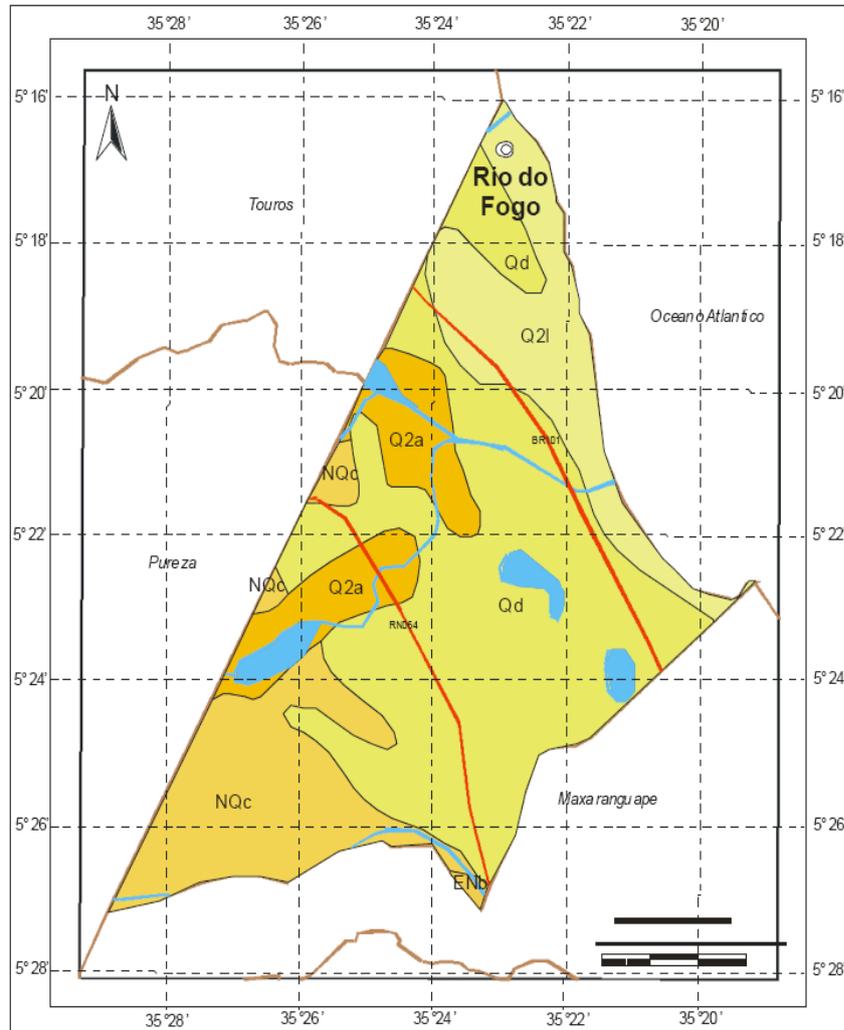
2.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

2.3.1 Geologia

A geologia da região costeira do município é formada por rochas sedimentares de idade cretácea, recobertas por rochas da Formação Barreiras e sedimentos do quaternário

(dunas, rochas praias, terraços marinhos e aluvionares, coberturas arenosas diversas) de acordo com Muehe (2006).

Observe-se o Mapa Geológico de Rio do Fogo (Figura 2.4).



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Cenozóico

- Q2a** Depósitos Aluvionares (a): areia, cascalho e níveis de argila.
- Q2l** Depósitos litóclásticos (l): areia fina a grossa e dunas móveis
- Qd** Dunas Inativas (d): areia bem selecionada
- NQc** Depósitos colúvio-eluviais: Sedimento arenoso, areno-argiloso e conglomerático.
- ENb** Grupo Barreiras (b): arenito e conglomerado, intercalações de silte e argilito.

CONVENÇÕES GEO LÓGICAS

— Contato geológico

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- Sede Municipal
- Rodovias
- Limites Intermunicipais
- Rios e riachos
- Lagoa

Figura 2.4 – Mapa geológico do município de Rio do Fogo

Fonte: CPRM (2005)

De acordo com o Mapa Geológico do Município de Rio do Fogo, a área de estudo encontra-se constituída de unidades litoestratigráficas com: (1) depósitos aluvionares: areia, cascalho e níveis de argila (Q2a); (2) depósitos litorâneos: areia fina a grossa e dunas móveis (Q2l); (3) dunas inativas (Qd): areia bem selecionada; (4) depósitos colúvio-eluviais: sedimentos arenosos, areno-argiloso e conglomerático (NQc); e (5) Grupo Barreiras: arenito e conglomerado, intercalações de siltito e argilito – ENb (CPRM, 2005).

2.3.2 Sedimentologia

Pesquisas desenvolvidas por Paiva (2011) revelam que a utilização de análise de medidas de transporte eólico por meio de coletores de areia (*sand traps*) ao longo de um campo de dunas na Praia de Maracajaú, município de Maxaranguape, a 26 km da área da pesquisa, possibilita estabelecer parâmetro de movimentação eólica nessa região, conforme ilustra a Figura 2.5. De acordo com Paiva: “Os cálculos de deriva eólica mostraram que as coletas de campo realizadas no mês de setembro de 2010, são as que indicam uma maior movimentação eólica de sedimentos no Campo de dunas com 0,439 kg de areia transportada por hora.” (Paiva, 2011, p. 26).

O estudo de Lima (2010) fez uma análise granulométrica caracterizando o tamanho dos grãos que compõem os sedimentos ao longo do campo de dunas na Praia de Pititinga, município de Rio do Fogo, em que mostra que as frações variam entre areia muito grossa (1,0 mm – 0,71 mm) a areia muito fina (0,062 mm), e não foi registrada a presença de frações correspondentes a seixos (4,0 mm) e a fração de grânulos (2,0 mm). Das frações registradas, a areia média (0,25 mm – 0,18 mm) foi a que obteve o maior percentual (entre 33% a 35%) seguida da fração de areia fina (0,125 mm – 0,090 mm) entre 3,7% a 15,2% e da fração de areia muito fina (0,062 mm) com 3,2% (informação verbal).¹

Média é à medida que fornece a distribuição média do tamanho das partículas (Toldo Jr., 1998). Segundo a classificação de Wentworth (1922 apud Muehe, 1996) são classificados em: cascalho (-1 Φ), areia muito grossa (-1 a 0 Φ), areia grossa (0 a 1 Φ), areia média (1 a 2 Φ), areia fina (2 a 3 Φ), areia muito fina (3 a 4 Φ). O tamanho do grão depende da natureza do material envolvido, do tempo e da distância do transporte.

Os resultados da análise dos sedimentos do campo de duna da Praia de Pititinga apresentaram uma variação de areia média a muito fina. Os resultados granulométricos

segundo Suguio (1973) servem para comparações entre as amostras, para desenvolvimento ou teste de comportamento dos sedimentos durante o transporte e deposição, interpretação das condições de gênese e/ou mapeamento das variações das características sedimentológicas. Os sedimentos de dunas estão em constante movimento, e nos processos de transporte, os sedimentos mais grossos seriam produtos de transporte por tração e os mais finos por saltação e suspensão (Suguio, 1980). Por serem os sedimentos constituídos de areia média e a muito fina, o tipo de transporte encontrado na área de estudo foi predominantemente por saltação e suspensão

De uma forma geral as características sedimentológicas do arco das dunas em estudo, evidenciam um ambiente sedimentar de energia moderada, corroborada pela presença de areia fina á muito fina.

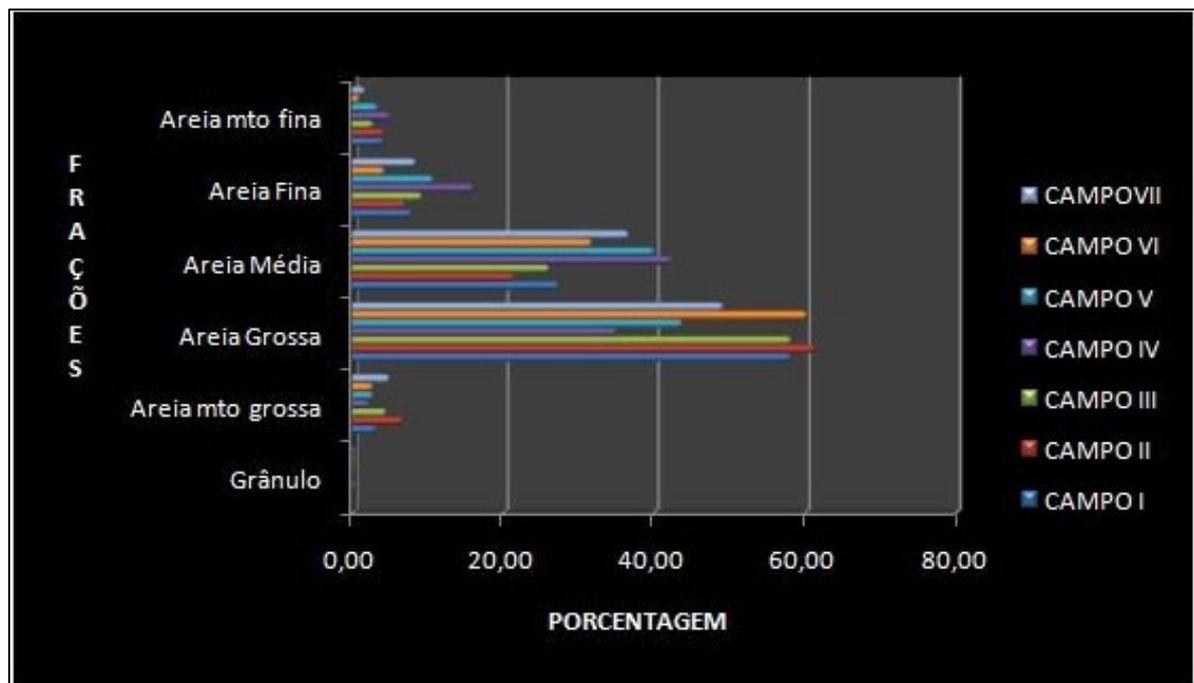


Figura 2.5 – Gráfico representativo da porcentagem granulométrica obtida em 100 g de cada amostra coletada adjacente aos coletores

Fonte: Paiva (2011)

¹ Informações sobre dados de sedimentologia, concedidas pelo Msc. Eduardo Queiroz de Lima, em dezembro de 2010.

2.3.3 Clima

A área estudada apresenta um clima do tipo As' – quente e úmido (segundo a classificação de Köppen), tendo como característica principal uma estação chuvosa, que inclui os meses de fevereiro até julho, e uma estação seca, com estiagem mais rigorosa entre outubro e dezembro.

Esses tipos de clima na região recebem influência das massas de ar advindas do Oceano Atlântico, sendo elas constituídas pelos ventos alísios de direção SE-NW.

Essas variações climáticas podem ser explicadas pela movimentação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), em que o período de seca se relaciona com seu afastamento da costa, provocando a ausência de chuvas e o domínio dos ventos fortes, enquanto os períodos chuvosos ligam-se ao seu deslocamento para o sul, relacionando-se com ventos mais brandos (Idema, 2002).

2.3.3.1 Pressão, temperatura, umidade relativa do ar, insolação e nebulosidade

Para caracterização do clima da área, utilizou-se como base de dados a Estação Meteorológica de Natal da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) no período 1986-2004. De acordo com a Tabela 2.1, as temperaturas médias anuais nos últimos vinte anos oscilam entre 22,8°C e 28,1°C, com umidade relativa do ar atingindo em média 76,5%.

A pressão atmosférica mostra-se relativamente estável, com poucas variações no período de registro, registrando uma média anual de 1771,06 mbar nos últimos vinte anos. Com relação à insolação e à nebulosidade, observa-se que são elementos climáticos inversamente relacionados.

A insolação média anual é de 7,6 horas/dia. No mês de fevereiro, nota-se a menor média mensal de 7,6 horas/dia de insolação.

Quanto à nebulosidade, constata-se uma média entre 5 e 6 na escala 0-10. A média anual do período observado foi de 5,3. Os meses que apresentam maior nebulosidade são janeiro, maio e junho (UFRN, 2005).

Tabela 2.1 – Histórico dos aspectos fisiográficos no período 1984-2004 na Grande Natal

Ano	Pressão atm. (mBar)	Temp. do ar mín.(°C)	Temp. do ar máx.(°C)	Umidade rel. do ar (%)	Vento (m/s)	Precipitação (mm)
1984	1009,6	22,9	29,6	78	5	2.101,5
1985	1007,3	23,1	29,2	78	3,6	2.224,1
1986	1007,9	22,9	29,2	77	3,8	2.438,5
1987	1007,9	23,2	29,8	74	4	1.478,1
1988	1008,2	23,3	29	74	4,3	2.159,3
1990	1008,2	23,2	29,5	78	4,8	1.233,6
1991	1007,8	22,6	29,5	78	5	1.298,6
1992	1007,6	22,2	29,6	79	4,6	1.615,4
1993	1007,4	22,6	29,5	81	5	858,2
1994	1007,4	23,3	29,5	83	4,5	2.179,2
1995	1007,1	22,6	29,6	82	4,3	1.575,5
1996	1006,8	22,9	29,8	82	4,2	1.576,6
1997	1007,4	23,2	29,7	82	4,4	1.188,7
1998	1007,3	23,2	30,2	82	4,7	1.646,9
1999	1007,1	20,3	29,7	81	4,5	1.111,2
2000	1007,7	20	29,4	89	4,2	2.260,2
2001	1008,1	20,3	29,6	81	4,6	1298,6
2002	1008,2	23,8	29,6	82	4,1	2028,2
2003	1008,2	23,9	29,8	81	4,2	1517,1
2004	1008,0	23,8	29,7	83	4,6	2371,6
Médias	1008,76	22,84	28,1	76,55	4,4	1.771,06

Fonte: UFRN (2005)

2.3.3.2 Precipitação

Como já mencionado, as variações anuais climatológicas encontram-se associadas ao movimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e dependendo de sua posição e tempo de permanência sobre a região, resultará em anos que se caracterizam por uma pluviosidade excessiva, enquanto em outros, esta ocorre de forma escassa, com situações de estiagem extremamente prolongadas.

Segundo Cunha (2004), observando os valores médios de precipitação para os últimos trinta anos, ressalta-se que os valores mais importantes ocorrem de fevereiro a agosto, com máximas em abril. O autor cita que o regime pluviométrico da região é do tipo tropical, em que ficam bem individualizadas duas estações distintas. Na maioria das vezes, o período chuvoso inicia-se em fevereiro, consolidando-se a partir de março com as chuvas concentrando-se nos seis meses consecutivos, com máximas, dependendo do ano, podendo

ocorrer de abril a julho. Em seguida, inicia-se o período de estiagem, prolongando-se até o início do próximo ano, com mínimas durante os meses de setembro a novembro. A taxa de precipitação acumulada, no primeiro semestre, supera 86% da precipitação anual, que é da ordem de 1.600 mm.

De acordo com dados da Estação Meteorológica da UFRN (Tabela 2.1), a pluviosidade apresenta grandes variações, por exemplo, registrando apenas 858,2mm em 1993 e atingindo quase 2.438,5mm em 1986.

O teor de umidade do solo é controlado pelo índice de precipitação e representa uma função importante no controle da taxa de disponibilidade de areia susceptível ao transporte pelo vento para alimentação dos campos de dunas, como também na própria dinâmica das dunas.

Assim sendo, a presença de um alto percentual de umidade leva a ocorrer um aumento das forças de coesão intergranulares que atuam como resistência ao transporte, tornando necessária a presença de ventos com velocidades mais elevadas do que as necessárias para superfícies arenosas secas.

2.3.3.3 Ventos

O Nordeste do Brasil apresenta características eólicas singulares, que o diferem de outros locais do planeta. Além disso, sua posição geográfica privilegiada, associada a uma extensa área litorânea, torna-a uma das regiões com maior disponibilidade de ventos, conforme ilustra a Figura 2.6, que apresenta o Atlas Eólico do Nordeste – *Wind Atlas for the Northeast of Brazil* (WANEB), publicado em 1998 pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica. Os dados inseridos no Atlas são resultado de simulações computacionais utilizando modelos atmosféricos e validados com base nos dados de ventos coletados em diversas estações anemométricas instaladas na região (Silva, 2003).

O transporte eólico é influenciado pelos parâmetros climatológicos (dados climáticos de precipitação pluviométrica, temperatura, umidade relativa do ar, insolação, bem como de velocidade e direção dos ventos atuantes), por sua vez, têm também interdependência entre si (por exemplo, temperaturas mais altas implicam ocorrência de umidade relativa do ar mais baixa).

Os campos de dunas de Rio do Fogo caracterizam-se, ainda, por estarem em uma região de maior velocidade de vento do Brasil (Figura 2.6), além de apresentar feições morfológicas que, durante seu processo de formação provavelmente tiveram seus sedimentos

constituintes transportados por ação eólica de sentido predominante SE-NW. Ocorrendo, portanto, perfeita correlação entre os dados de direção de ventos, medidos pelas duas estações climatológicas citadas, e a morfologia dos campos de dunas de Rio do Fogo. Segundo dados de Silva (2003), estima-se que a velocidade média anual do vento, a 65m de altura, é 7,5m/s.

Segundo Silva (2003), as características eólicas do Nordeste do Brasil sofrem influência por eventos climáticos de microescala, decorrentes em condições localizadas que muito diferem das características gerais da circulação em macroescala e mesoescala. Diversos fatores inerentes a um determinado local podem afetar o comportamento dos movimentos atmosféricos e são denominados de Fatores Locais.

Os principais fenômenos de microescala observados na região Nordeste são resultantes da contínua geração de vórtices em razão da fricção do vento sobre a superfície. A presença dessas forças de fricção leva a velocidade do vento a diminuir sua intensidade à proporção que se aproxima do solo, induzindo o surgimento de um perfil vertical de velocidade. Esse gradiente vertical produz fortes variações (também conhecida como turbulência atmosférica) de alta frequência na velocidade do vento.

O comportamento do fluxo de ar depende exclusivamente da superfície incidente, cada uma delas influencia de maneira diferenciada. A intensidade dessa influência vai depender das condições topográficas e de cobertura do solo. De acordo com Silva, os principais mecanismos de microescala podem ser agrupados em três grandes conjuntos:

(I) Fenômenos aerodinâmicos relacionados a topografia do local (como elevações ou depressões isoladas, serras e pequenas chapadas) e a obstáculos naturais ou artificiais (como cadeias de árvores ou construções);(II) Fenômenos associados a mudanças na rugosidade dentre duas ou mais superfícies; (III) Fenômenos relativos às variações do fluxo de calor no cruzamento do limite entre duas superfícies de características diferentes. (Silva, 2003, p. 29).

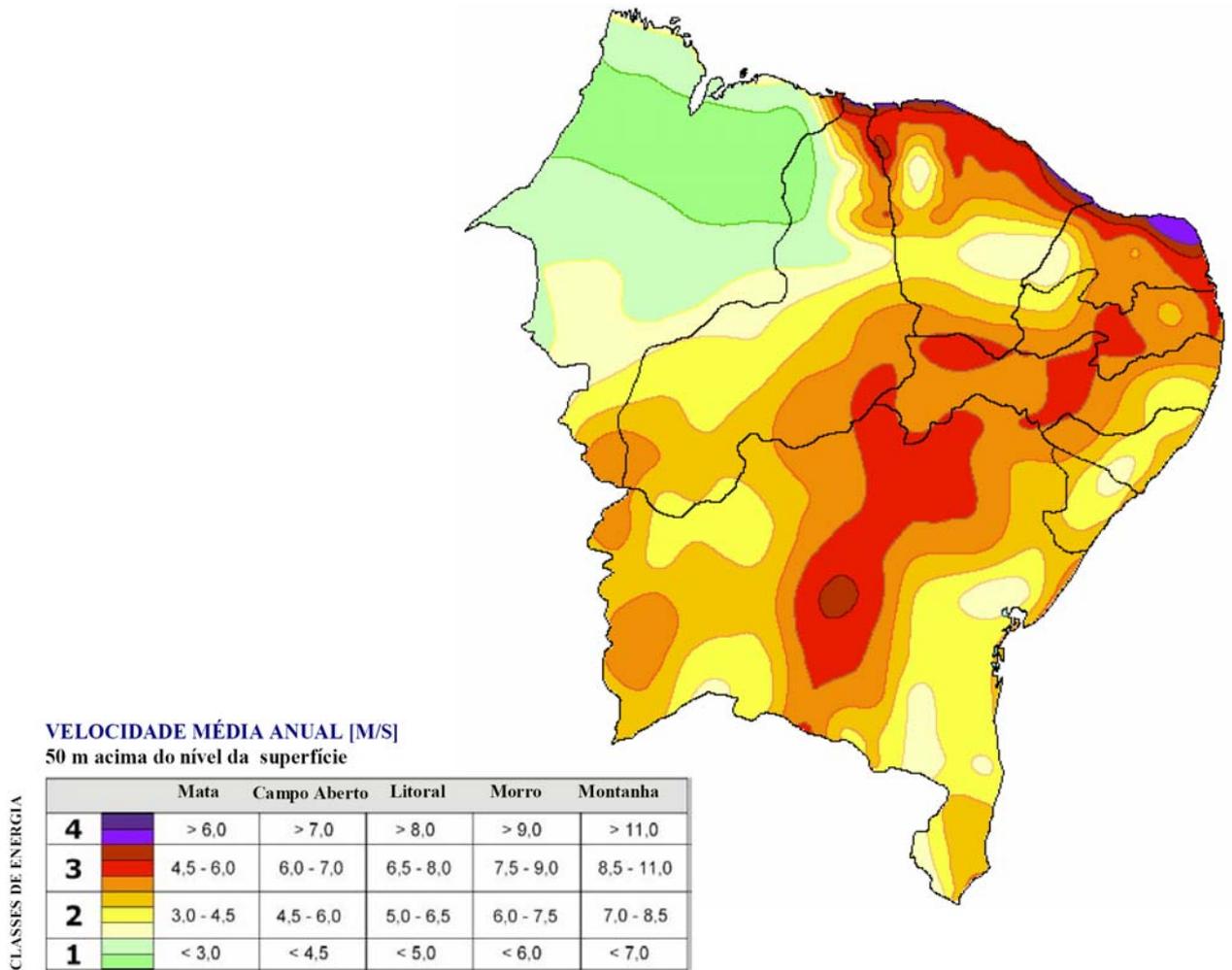


Figura 2.6 – Atlas eólico do Nordeste do Brasil
Fonte: Silva (2003)

Na Figura 2.7, apresenta-se um esquema de vários fatores locais que influenciam o vento.

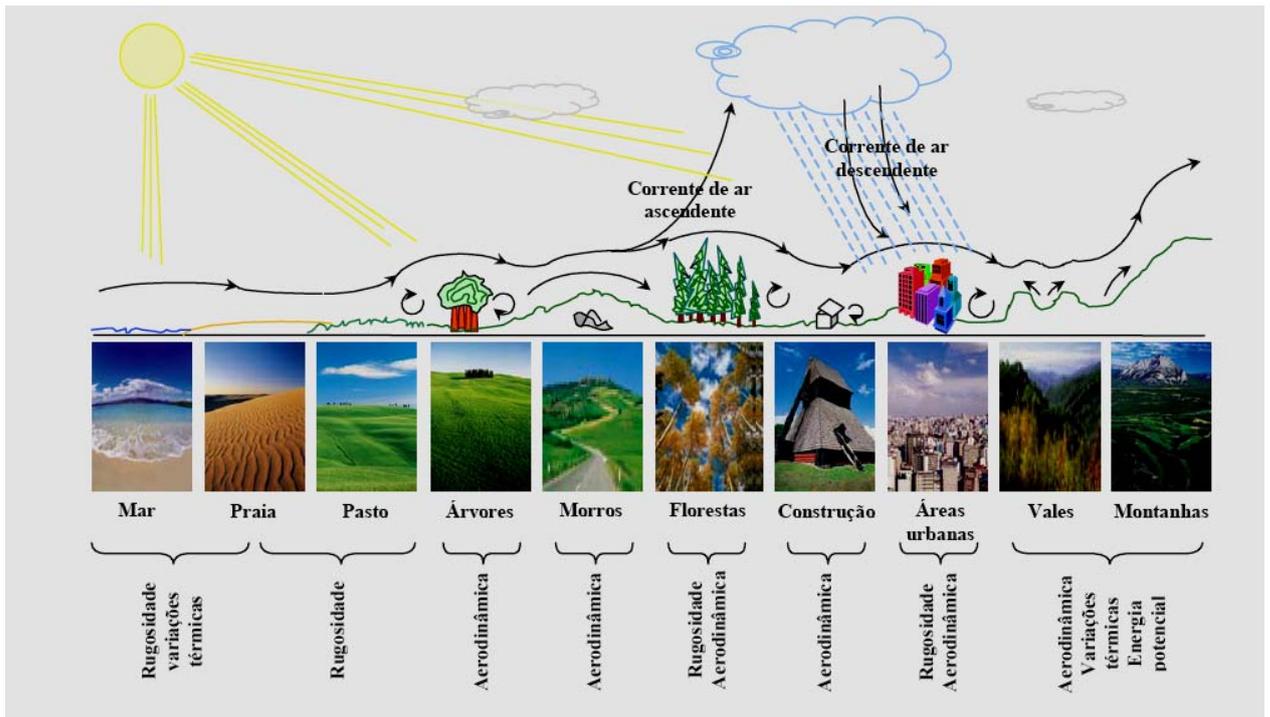


Figura 2.7 – Esquema de efeitos de diferentes fatores locais
Fonte: Silva (2003)

O litoral extremo norte do Piauí ao extremo sul no Rio Grande do Norte apresenta as condições de vento conduzidas, principalmente, pelo ciclo anual de posição da intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelas fortes ocorrências de brisas marítimas. Essa zona costeira tem regimes eólicos muito fortes, apresentando velocidades médias anuais entre 7 e 9,5 m/s (50 m de altura). A causa da elevada velocidade dos ventos nessa região costeira se deve à ação conjunta dos ventos alísios e das fortes brisas marinhas, influenciadas pela aproximação da ZCIT (Silva, 2003).

O regime de ventos sobre o litoral nordestino se governa pelo padrão geral de distribuição da pressão atmosférica no Oceano Atlântico Sul. Esse setor do Atlântico caracteriza-se pela presença do centro de alta pressão subtropical (ASAS), cuja posição e intensidade alteram durante o ano (Cunha, 2004).

O anticiclone no início do ano (fevereiro) apresenta menor intensidade e se posiciona mais próximo da costa africana (aprox. a 28° S; 010° W). Nessa situação, a costa nordestina experimenta ventos fracos de sudeste. No segundo semestre, principalmente em agosto, o desenvolvimento da Zona de Baixa Pressão Antártica desloca o anticiclone do Atlântico Sul para noroeste, fazendo este se intensificar e se dividir em dois centros: o maior deles, situando-se mais próximo à costa brasileira (aprox. a 23,5° S; 030° W), responde pelos ventos mais fortes de sudeste que chegam à costa nordestina nesse período do ano.

As velocidades médias mensais apresentadas na Tabela 2.1 foram obtidas em um período de vinte anos (de janeiro/1984 a dezembro/2004), apresentando ventos predominantes com velocidades médias de 4,4m/s e direção predominante SE/NW, conforme ilustra o mapas do Brasil onde estão posicionados vetores de direção e dados de velocidade dos ventos, nos últimos trinta anos, conforme ilustra a Figura 2.8.

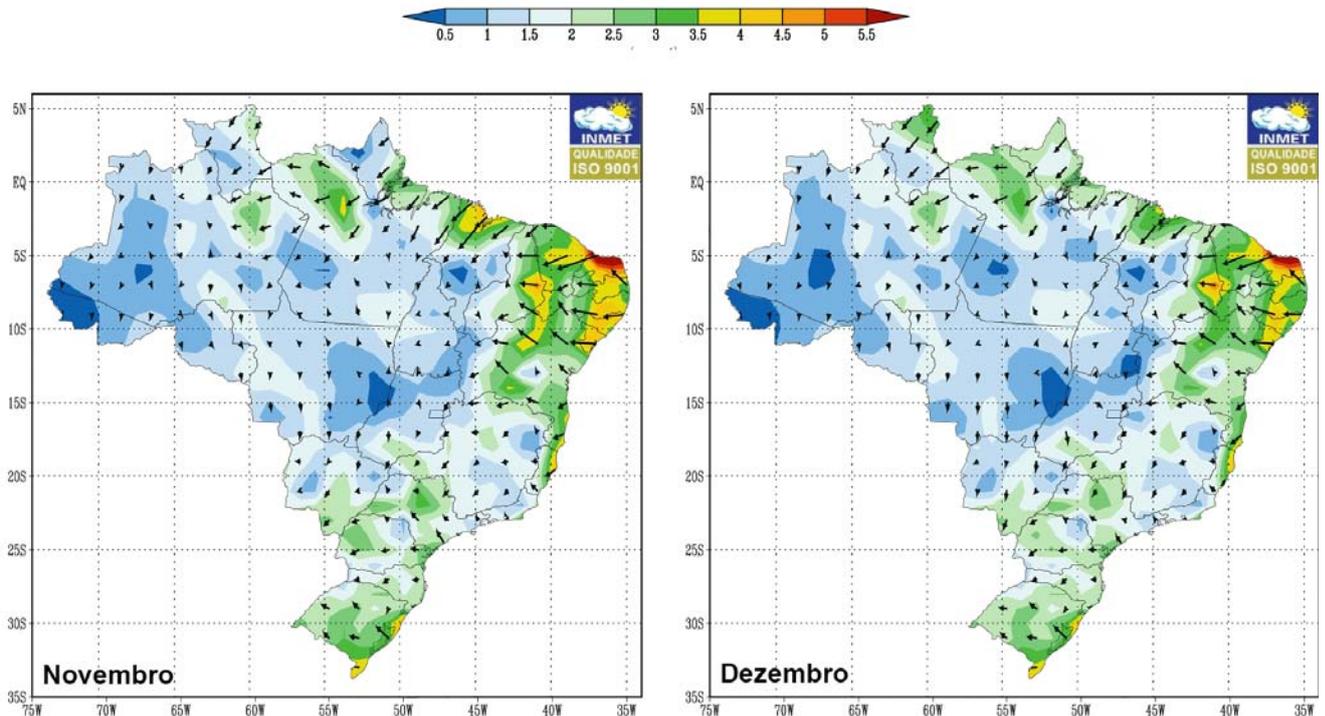


Figura 2.8 – Dados de velocidade e direção dos ventos nos últimos trinta 30 anos
Fonte: INMET (2009)

De acordo com Alves *et al.* (2003), no verão há uma tendência de orientação EW e ENE das dunas localizadas no segmento costeiro de direção EW próximo à região do Cabo Calcanhar (Figura 2.9), o que indica que os ventos são um dos principais responsáveis pela dinâmica costeira da região estudada.

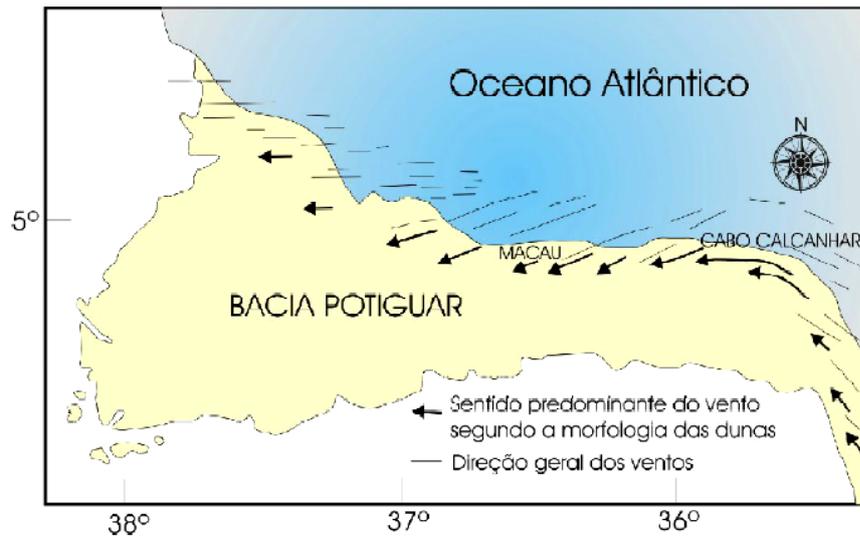


Figura 2.9 – Direção predominante dos ventos ao longo da costa norte do estado do RN
Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2003)

CAPÍTULO III – EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 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, recobertas 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 Açu, onde também se encontram minerais economicamente importantes como petróleo, calcário, argilas, diatomita, feldspato e o caulim, entre outros.

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

3.1.1 Bacia Potiguar

A área de estudo localiza-se na Bacia Potiguar – conforme ilustra a Figura 3.1 –, sendo essa a mais oriental das bacias da margem equatorial, destacando-se por sua importância econômica. Atualmente constitui-se um dos principais produtores de petróleo em terra do Brasil, com uma produção em torno de 100 mil barris/dia (Nunes, 2008).

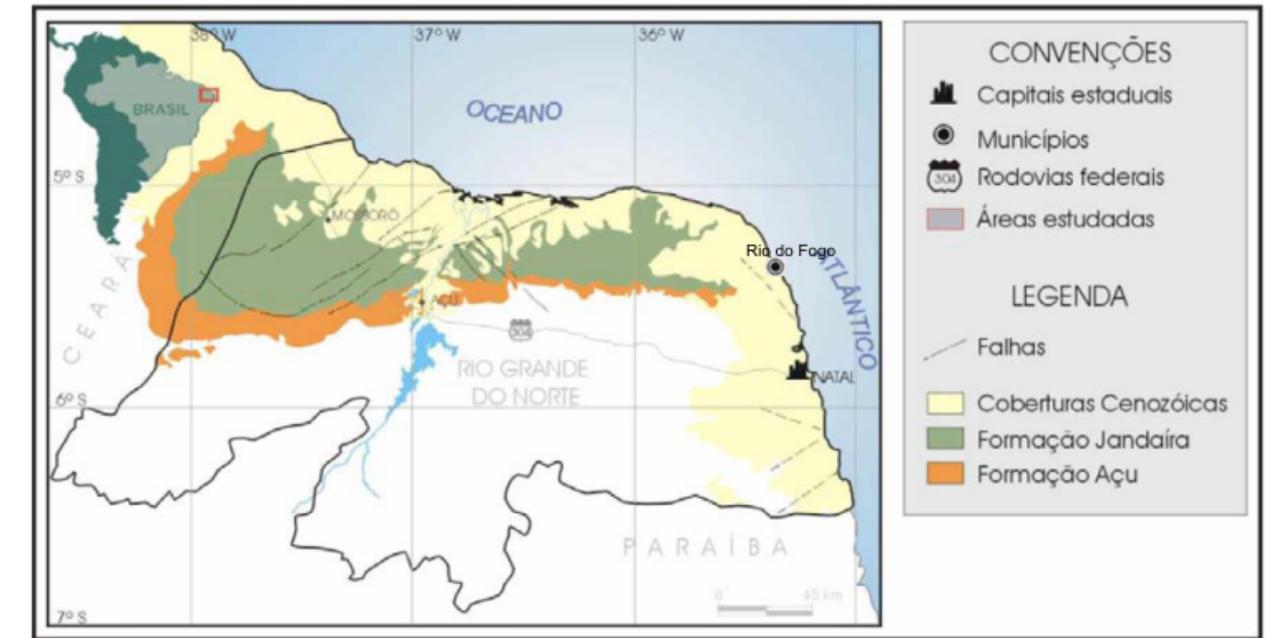


Figura 3.1 – Mapa de localização da Bacia Potiguar

Fonte: Adaptado de Mont'Alverne *et al.* (1988)

Estudos precursores nessa bacia foram realizados por Burlamaqui (1855) e, posteriormente, por Crandal (1910), ambos citados por Mabesoone *et al.* (1972); Sopper (1913), Maury (1924, 1934), citados por Fortes (1987), que descreveram os calcários fossilíferos na região de Natal. Atribuiu-se aos fósseis dessa região uma idade turoniana. Oliveira & Leonardos (1943 *apud* Mabesoone *et al.*, 1972), percorreram toda a bacia e denominaram de Grupo Apodi as rochas calcárias aflorantes. Cypriano & Nunes (1968 *apud* Fortes, 1987), convencionaram a Formação Jandaíra e subdividiram-na em três membros.

Pesquisas também confirmaram a ocorrência da Formação Gangorra (sequência de clásticos finos, predominantemente folhelhos escuros, cinza-esverdeados e carbonosos, abaixo da Formação Açú), e distinguiram a Formação Jandaíra. Mayer (1974 *apud* Nogueira *et al.*, 1984) formalizou a subdivisão da Formação Açú em três membros. Sugeriu a criação de uma coluna estratigráfica composta pelas seguintes formações: Açú, Ubarana, Salgado, Macau e Tibau. Fundamentados nos estudos anteriores e em dados de cerca de 4.000 poços e de mais uma centena de quilômetros de seções de sísmica de reflexão (78% no mar), Araripe & Feijó (1994 *apud* Dote Sá, 2000) apresentaram a definição das unidades durante muito tempo usada e aceita pela comunidade (Cunha, 2004). Segundo Pessoa Neto *et al.* (2007) – baseados em estudos anteriores realizados na Bacia Potiguar, como Araripe & Feijó (1994), e em função de novos dados de poços perfurados na porção emersa e na submersa –, algumas unidades informais se incorporaram à coluna estratigráfica da bacia (Figuras 3.2 e 3.3).

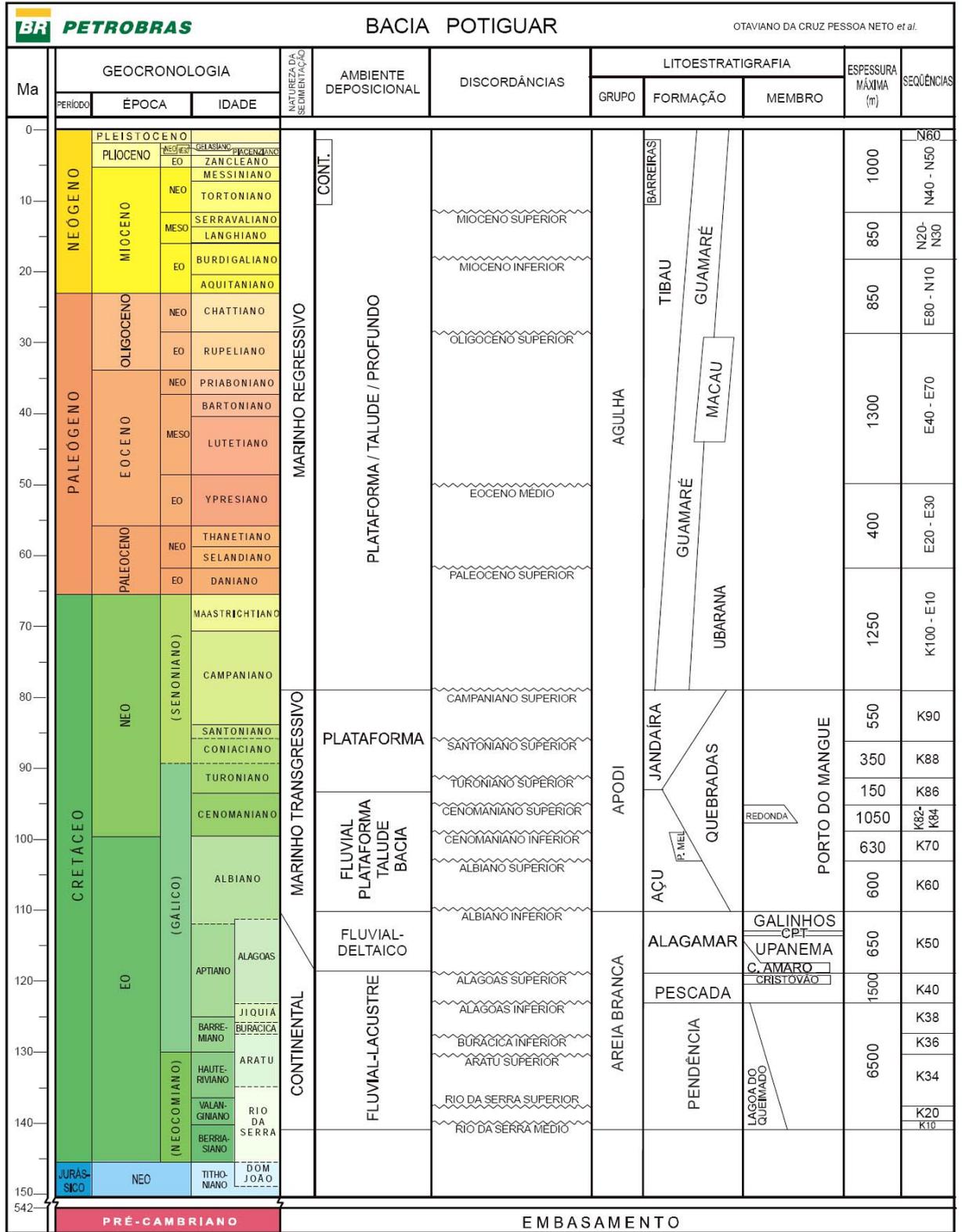


Figura 3.2 – Coluna cronoestratigráfica da Bacia Potiguar: geocronologia, ambiente deposicional, discordância e litoestratigrafia

Fonte: Pessoa Neto *et al.* (2007)

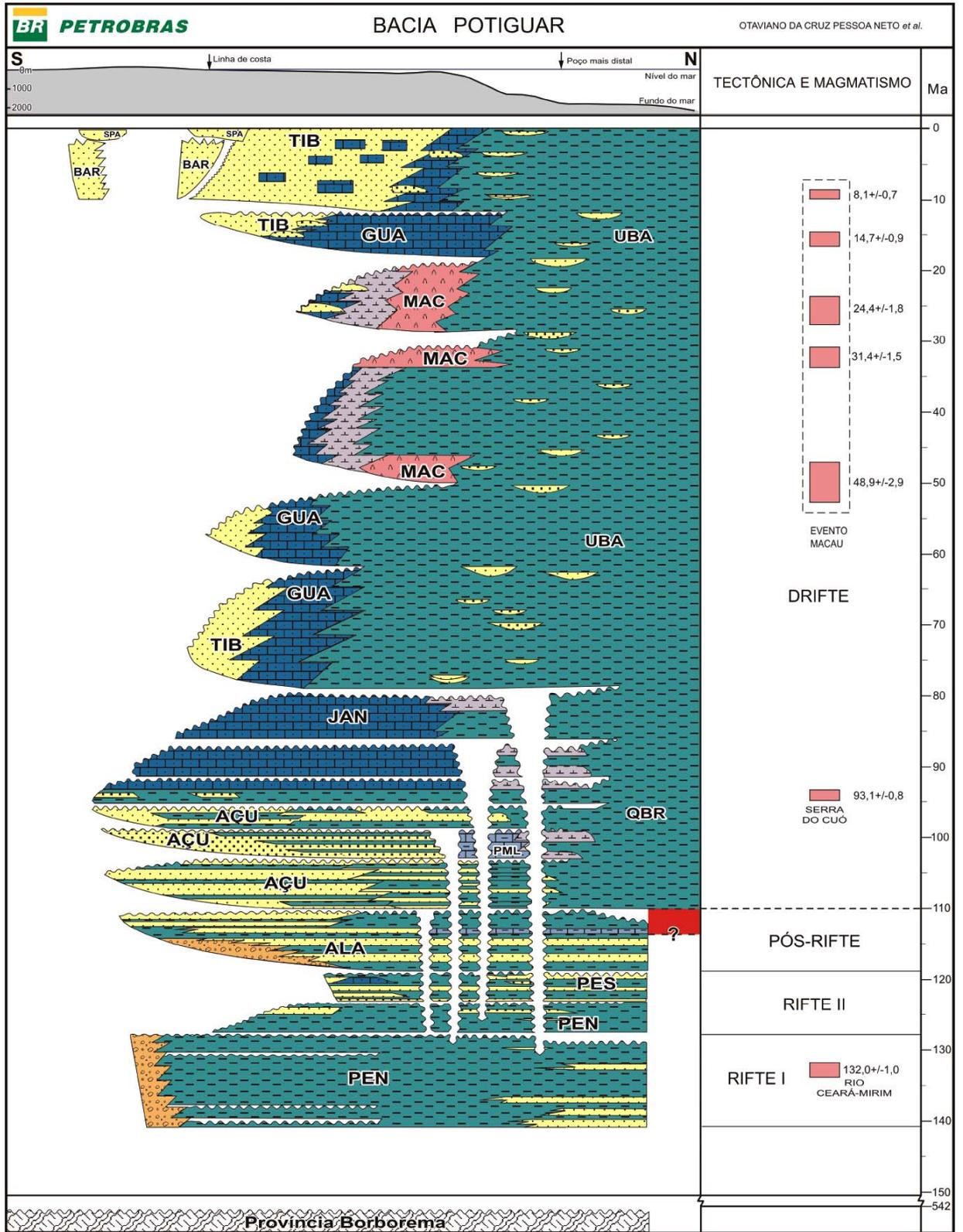


Figura 3.3 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar: seção colunar, tectônica e magmatismo
 Fonte: Pessoa Neto *et al.* (2007)

Baseado nesses dados, três novas unidades litoestratigráficas são propostas para a bacia, e uma quarta foi redefinida.

As propostas apresentadas por Pessoa Neto *et al.* (2007) foram: (1) redefinição do Membro Porto do Manguê da Formação Quebradas (Grupo Apodi); (2) Membro Lagoa do Queimado da Formação Pendência (Grupo Areia Branca); (3) Membro Canto do Amaro da Formação Alagamar (Grupo Areia Branca); (4) Membro Cristóvão da Formação Pescada (Grupo Areia Branca).

A Bacia Potiguar, de acordo com Pessoa Neto *et al.* (2007), tem registro estratigráfico que inclui três supersequências: uma Supersequência Rifte, depositada no Cretáceo Inferior; uma Supersequência Pós-Rifte, depositada durante o Andar Alagoas; e uma Supersequência Drifte, depositada entre o Albiano e o Recente. A Supersequência Rifte é representada pelos depósitos fluviodeltáicos e lacustres das Formações Pendência e Pescada (Berriasiano/Eoaptiano). A Supersequência Pós-Rifte é formada pela deposição de uma Sequência flúviodeltáica, onde ocorreram os primeiros registros de ingressão marinha (Formação Alagamar). Enquanto a Supersequência Drifte caracteriza-se por uma sequência fluviomarina transgressiva (Formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas, Jandaíra e Ubarana), recoberta por uma sequência clástica e carbonática regressiva (Formações Ubarana, Tibau e Guamaré). Pessoa Neto *et al.* (2007) relatam ainda que as rochas vulcânicas associadas à Formação Macau foram depositadas entre o Eoceno e o Oligoceno na bacia.

3.2 AMBIENTE COSTEIRO – DUNAS

A zona costeira é um ambiente complexo e sensível, onde ocorrem diversos processos hidrodinâmicos que relacionam os ambientes continentais compostos por desembocaduras fluviais, estuários e deltas, e ambientes marinhos formados por 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 é o ambiente marinho, 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 a fragilidade.

Esses 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 dunas formam um

sistema complexo, e, segundo Viles & 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 que proporcionam condições de equilíbrio dinâmico são de grande relevância do ponto de vista geológico, estabelecendo um defensor natural da ação das ondas e ecológico, pela presença de espécie nativa.

De acordo com Carter (1988), as dunas ocorrem de forma significativa nas linhas de costas onde a disponibilidade de sedimentos texturalmente adequados é abundante, como as encontradas na costa noroeste da Europa, sudoeste da África, sudeste da Austrália e no Nordeste do Brasil, que apresenta uma área considerável coberta por campo de dunas, destacando-se os Lençóis Maranhenses e o litoral do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte conforme Figura 3.4.

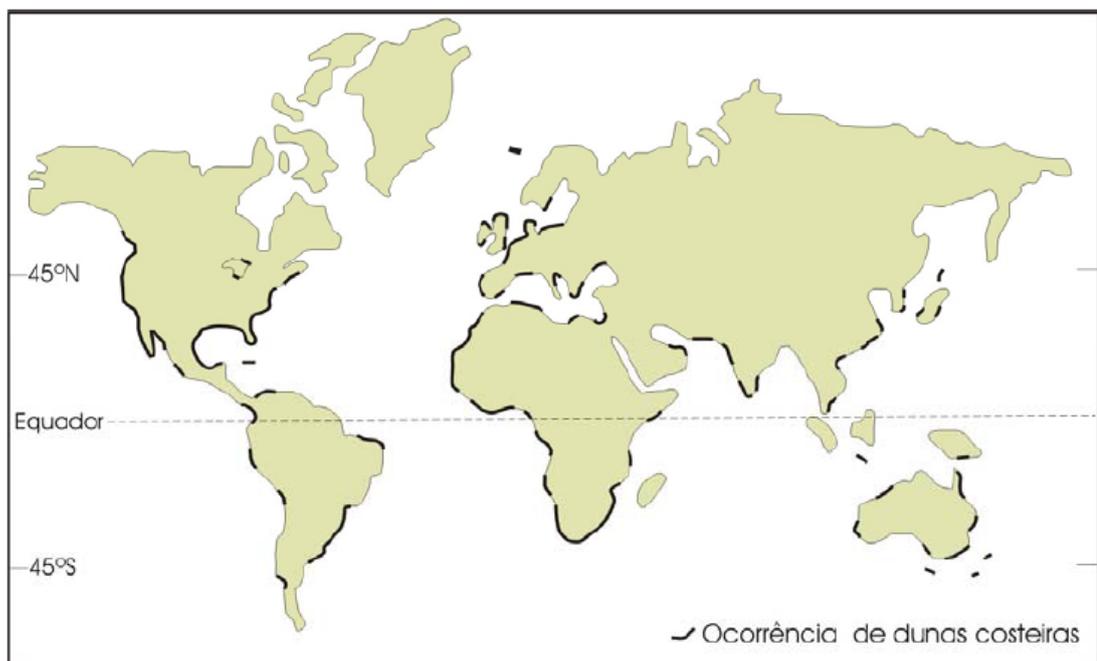


Figura 3.4 – Distribuição dos maiores campos de dunas costeiras do mundo
Fonte: Adaptado de Carter (1988)

Segundo Goldsmith (1978), Reineck & 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* (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Esquema do movimento dos sedimentos eólicos sobre a forma de dunas

Fonte: Cunha (2004)

Nota: a erosão ocorre na face a barlavento e a deposição na face a sotavento. Na foto, perfil de uma duna barcana no litoral de Santa Catarina mostrando o sotavento e barlavento

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.

Quanto à estrutura interna, Reineck & Sing (1980) distinguem as dunas por terem três tipos de estratificações principais: as estratificações de baixo ângulo (*horizontal bedding*), formadas por camadas de areia quase horizontais, com mergulhos variando de 3 a 10°, constituídas de grãos bem selecionados, às vezes alternadas por laminações compostas de minerais pesados; as estratificações cruzadas (*cross-bedding*), com ângulos de mergulho entre 25° e 34°, decorrentes do processo de migração da duna por fluxo de grãos e queda de grãos; e as superfícies limitantes (*lower bounding surfaces*), que podem ser geradas pela variação do lençol freático, que controla o nível de erosão da duna ou ainda pelo cavalgamento ou superimposição de dunas.

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 & Sing, 1980).

Dunas estacionárias ou inativas têm sua imobilidade decorrente de fatores como o aumento de umidade, a agregação dos grãos, a atuação de obstáculos internos (troncos, blocos de rocha, entre outros) ou o desenvolvimento de vegetação de fixação. Nas dunas migratórias ou ativas o transporte de grãos segue inicialmente o ângulo da face de barlavento, depositando-se a seguir no sotavento, gerando uma estrutura interna de leitos com mergulho próximo da inclinação de sotavento – a inclinação máxima para a existência de situação de repouso dos sedimentos é de 34°, de acordo com Reineck & Sing (1980) – e causando a migração do corpo da duna.

De acordo com Hunter (1977), a migração de um campo de dunas ocorre segundo dois processos sedimentares principais: laminação por queda de grãos e estratificação cruzada por fluxo de grãos.

As dunas podem adquirir formas com tamanhos distintos dependendo da velocidade do vento, dos tipos e da taxa de suprimento de areia, das características da superfície percorrida pelos grãos transportados pelo vento e da presença ou não de vegetação fixadora. Formas essas orientadas no sentido perpendicular ou paralelo ao sentido preferencial do vento, bem como adquirir, também ter formas bastante complexas.

Segundo os estudos apresentados por Glennie (1970), Goldsmith (1978), Reineck & Sing (1980), Collinson & Thompson (1982), McKee (1983), Carter (1988), Pye & Tsoar (1990) e Thomas (1997), os tipos mais comuns de dunas eólicas são as dunas barcanas (*barchan dunes*), as dunas transversais (*transverse dunes*), as dunas parabólicas (*parabolic dunes*) e as dunas longitudinais (*seif dunes*), e ainda de forma secundária, as dunas estrela (*star dunes*), as dunas em forma de “domos” (*dome-shaped dunes*) e as dunas reversas (*reversing dunes*).

O estudo de Silva (2002) descreve as divisões ou classificações principais de gerações ou sistemas de dunas da região de Natal/RN, propostas pelos autores relacionados no Quadro 3.1, assim como os critérios de classificação utilizados. Observa-se também, uma predominância de divisões em duas gerações ou sistemas, sendo de forma geral um mais antigo e outro mais recente, com destaque para a divisão em “dunas fixas ou paleodunas” e “dunas móveis ou recentes” proposta por diversos autores.

Por outro lado, segundo McKee (1979), as dunas, em geral, podem ser classificadas como simples, compostas e complexas (ou megadunas); as simples constituem-se de formas

de dunas individuais, as quais são espacialmente separadas das suas vizinhas; as dunas compostas de duas ou mais dunas de mesmo tipo, as quais se apresentam coalecidas ou superimpostas, e; as dunas complexas consistem de dois ou mais tipos de dunas simples, as quais também se apresentam coalecidas ou superimpostas.

Quadro 3.1 – Divisão e classificação de gerações ou sistemas de dunas para a região de Natal/RN segundo proposta de diversos autores

AUTORES	DIVISÃO / CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO
Costa (1971)	Dunas mais antigas, subdivididas em dunas primitivas e dunas antigas Dunas de idade intermediária Dunas do pleistoceno mais superior Dunas atuais	Morfologia; topografia; condições de fixação e migração e coloração
Costa & Perrin (1981)	Primeiro sistema (mais antigo e extenso) Segundo sistema (mais delgado)	Idade (relativa); extensão e coloração
Andrade (1968); Nogueira (1981a, 1981b, 1982); Nogueira <i>et al.</i> (1984); Nazaré Júnior (1993); Duarte (1995)	Dunas fixas ou paleodunas Dunas móveis ou recentes	Idade (relativa); morfologia; textura e coloração
Silveira & Vilaça (1985)	Subdomínios eólicos identificados: superfícies de deflação campos de dunas bacias de deflação campos de paleodunas	Morfologia
Vilaça (1986)	Formação Potengi	Idade (relativa); textura e coloração
Vilaça <i>et al.</i> (1986)	Depósitos dunares subrecentes ou paleodunas Depósitos dunares recentes	Morfologia; condições de transporte e deposição dos grãos; grau pedogenético; variações do nível do mar e condições ambientais
Santos <i>et al.</i> (1992)	Línguas dunares Cordões de dunas	Morfologia e condições ambientais
Melo (1995)	Dunas mais antigas Dunas mais recentes ou atuais	Idade (relativa); topografia; litologia e coloração.

Fonte: Silva (2002)

De acordo com Pye & 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. Outro resultado relevante é que o deslocamento das dunas nunca é totalmente interrompido em virtude das condições climáticas semiáridas da área do estudo e intervalos de dias sem precipitação pluviométrica durante a estação chuvosa.

Na pesquisa, Castro (2004, p. 9) conclui:

[...] o conhecimento e quantificação do balanço sedimentar associado ao transporte de sedimentos eólicos em dunas costeiras requerem a utilização de modelos que levem em conta a topografia deposicional, a parametrização do agente transportador (vento) e as condições inibidoras ou potencializadoras dessa ação, particularmente a umidade e a capacidade de secagem da superfície sedimentar eólica.

Segundo o Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente (Idema, 2002) do Rio Grande do Norte, na área de estudo, ocorrem a Formação Barreiras, os cordões de paleodunas e cordões de dunas móveis. A fotografia aérea da Figura 7 ilustra o campo de dunas de Rio do Fogo.



Figura 3.6 – Fotografia aérea do campo de dunas barcanas no município de Rio do Fogo
Fonte: Cedida pelo geólogo Reginaldo Lima Verde (2000)

A área de transição entre as paleodunas e dunas móveis e o Formação Barreiras se faz por meio de superfície de discordância erosiva, identificam-se áreas desnudas da Formação Barreiras, com a exposição de superfícies com crostas lateritizadas (canga lateríticas). Os cordões de paleodunas ocorrem no interior das áreas fixadas pela vegetação; onde não há presença de cobertura vegetal, encontram-se dunas móveis. Nessas áreas sem cobertura vegetal, observa-se continuamente um processo de ação eólica, o que provoca a mudança da paisagem, por meio da migração das dunas móveis, soterrando as paleodunas e provocando a exposição de superfície da Formação Barreiras. Na área da investigação, as dunas fixas e móveis encontram-se intercaladas.

No campo de dunas de Rio do Fogo encontram-se as barcanas, cristas barcanoides e parabólicas descritas e ilustradas a seguir:

Dunas barcanas – segundo Branco *et al.* (2003), essas dunas apresentam cristas em forma de meia-lua, com a face convexa voltada para barlavento (*windward ou stoss side*), com inclinação média de 12° e a côncava para sotavento (*leeward ou lee side*), caracterizada por uma face de deslizamento de $33-34^\circ$ (*slipface*). De acordo com Nickling (1983), encontram-se as dunas barcanas em áreas onde o suprimento de areia é limitado, o vento é unidirecional, as superfícies regionais são relativamente planas e limitada cobertura vegetal. Ilustra-se essa feição eólica na Figura 8. Bagnold (1941) mostra que as dunas barcanas podem evoluir em função de mudanças no regime de ventos no caso de unidirecional para bidirecional, assumindo formas lineares, denominando-as de dunas lineares (*seifdunes*).

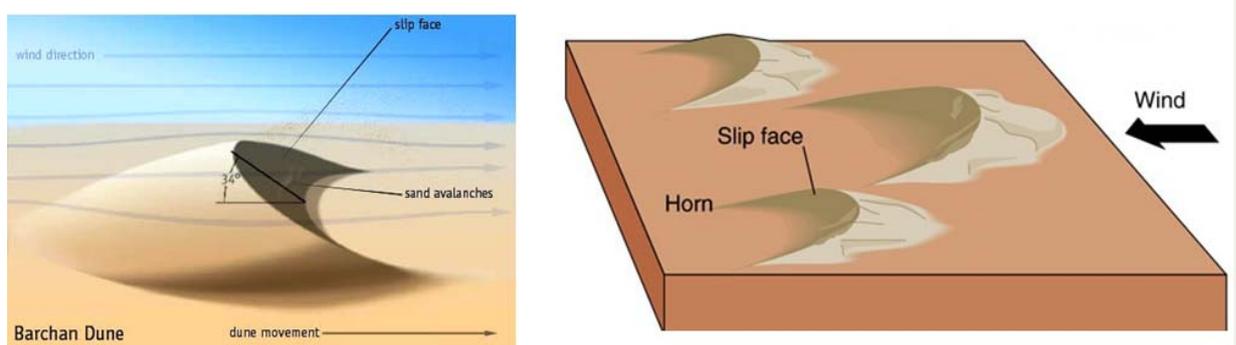


Figura 3.7 – Dunas barcanas

Fonte: Week 11 <http://www.indiana.edu/~geol116/Week11/wk11.htm>

Cristas barcanoides – de acordo com McKee (1979), a origem da formação das cristas barcanoides está na justaposição lateral de várias dunas barcanas, que evoluem para formar

um sistema em cadeias. Enquanto sua morfologia se caracteriza por cristas onduladas e paralelas, sendo elas perpendiculares à direção dominante dos ventos.

Dunas parabólicas (*Parabolic Dunes*) – as dunas parabólicas se caracterizam por sua forma de “U” ou de “V”, com o lado côncavo voltado para barlavento e a parte convexa para sotavento. O desenvolvimento dessas dunas se associa aos efeitos resultantes das variações de velocidade de migração entre seus braços, que, geralmente, se encontram semifixados pela vegetação e/ou umidade, e sua parte central que migra rapidamente em virtude da ausência de cobertura vegetal. McKee (1979) enfatiza que essas feições eólicas fazem parte de uma classe de dunas em que o desenvolvimento da forma é controlado, aparentemente, mais pela presença de vegetação e umidade do que pela força e direção do vento. De acordo com Tinley (1985), em razão da migração mais lenta, os braços tendem a se prolongar, deixando ao lado do seu percurso topos paralelos de dunas, os quais resultam em um tipo de duna denominado de “deflação de duna parabólica”, de forma semelhante a um grampo de cabelo (*hairpin*).

Os sedimentos areno-argilosos, com intercalações de sílticas e conglomeráticas, estão nas litologias da Formação Barreiras. À parte superficial dessa formação, tem-se a ocorrência de cascalheiras e materiais lateríticos. As paleodunas se formam predominantemente por quartzo em forma de areias quartzosas, bem selecionadas e arredondadas. Enquanto as dunas móveis, constituem-se predominantemente de quartzo em forma de grãos arredondados, bem selecionados, inconsolidados, de coloração clara, foscas e granulação média. É comum a presença de restos de carapaças de animais marinhos (Idema, 2002).

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 3.8): 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.

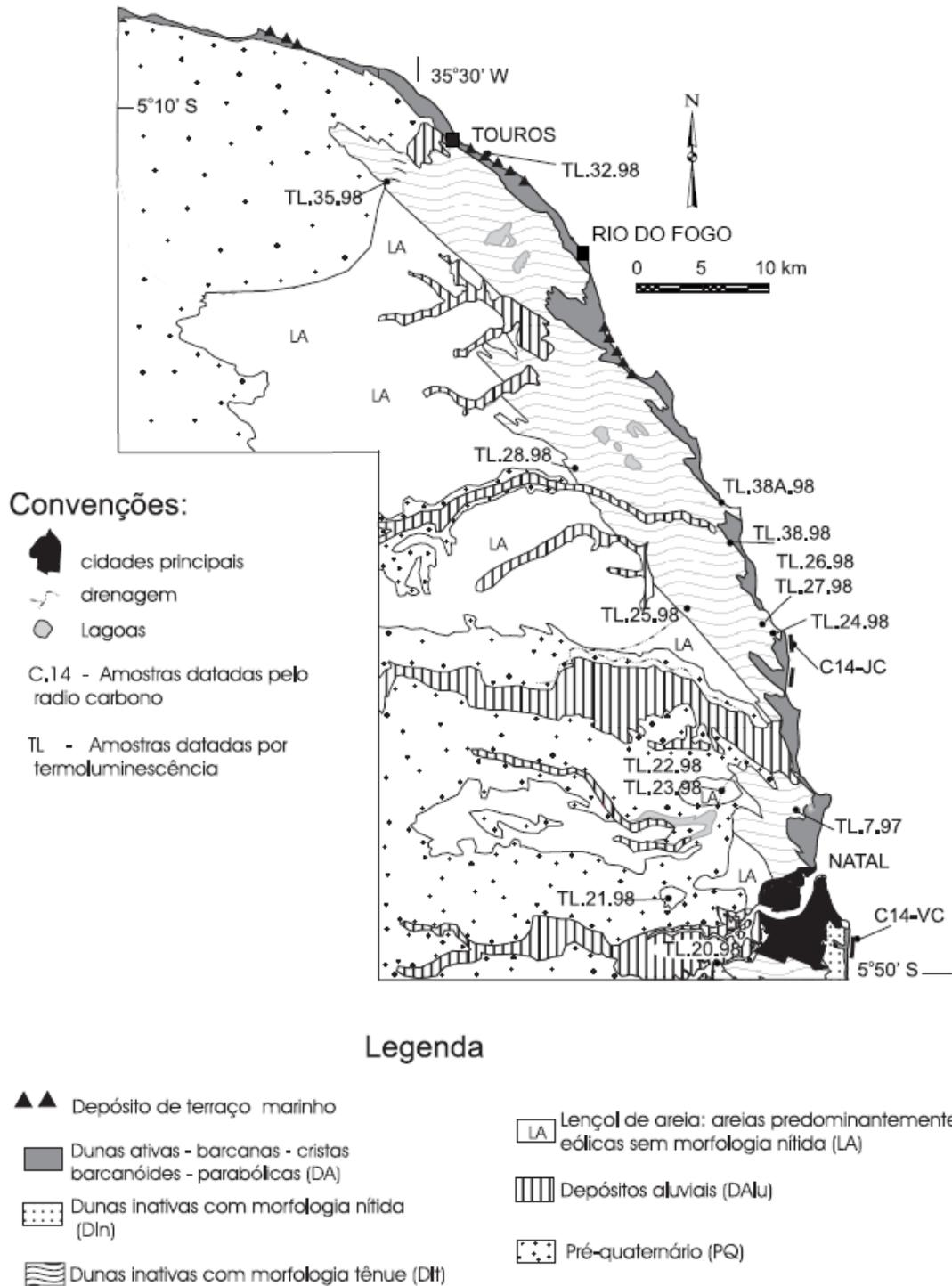


Figura 3.8 – Mapa geológico do Quaternário costeiro do Rio Grande do Norte
 Fonte: Barreto *et al.* (2004)

3.2.1 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 3.9) diferenciam até três gerações de dunas, enquanto no litoral oeste do Ceará, identificou-se a quarta geração de dunas.

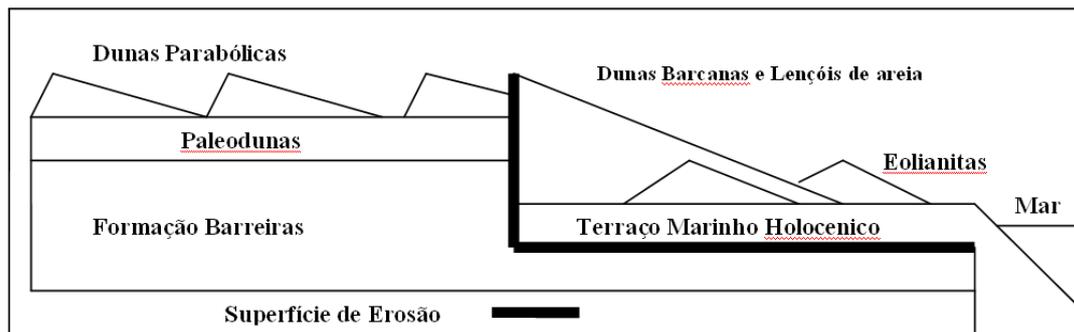


Figura 3.9 – Relações estratigráficas entre as gerações de dunas
Fonte: Maia (1998)

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.

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:

[...] um campo aproximadamente uniforme por 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 t_0 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 de 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 o Quaternário (Maia, 1998).

3.2.2 Ondas

As ondas são produzidas pela ação do vento soprando sobre a superfície no oceano aberto, em função da transferência de energia do movimento da água sobre a água (Press *et al.*, 2006). Os ventos, por soprarem em rajadas, determinam variação de pressão que produz uma oscilação vertical na superfície da água, assumindo uma aparência rugosa. A consequência da ação conjunta de variações de pressão, tração e turbulência origina a forma de ondulações, conhecida segundo Muehe (2005) como ondas de gravidade.

Ondas secundárias (*seas*) podem ser geradas próximas à linha de costa em razão da atuação dos ventos fortes ou produzidas por alterações gravitacionais no litoral. As ondas estacionárias (*standing waves*) são aquelas cuja energia da onda pode ser refletida pela face da praia e, desse modo, conservar-se aprisionadas na costa. As ondas de ressonância (*edge waves*) são aquelas que se integram novamente ao oceano (Souza *et al.*, 2005).

De acordo com Teixeira *et al.* (2000), a maneira como a onda arrebenta relaciona-se diretamente com o gradiente do fundo marinho e da geometria da onda. A arrebentação mais encontrada é nomeada de progressiva, derrame ou deslizante (*spilling*), peculiar de praias rasas e pouco inclinadas; as ondas iniciam sua quebra longe da linha d'água, parecendo deslizar sobre a água. A segunda arrebentação é conhecida como mergulhante (*plunging*), conhecida também como tubo ou caixote, e ocorre em praias intermediárias, de inclinação moderada; as ondas quebram próximas à linha d'água, desenvolvendo um tubo que se fecha

subitamente, gerando turbulência. Outro tipo de arrebentação é conhecido como ascendente (*surging*), ocorre em fundos tão inclinados que a onda entra em colapso sem arrebentar, pois a base da onda avança sobre a face da praia interagindo com o fluxo das ondas anteriores. Há outro tipo de arrebentação denominado frontal (*collapsing*), um tipo entre a mergulhante e ascendente, desenvolve-se em praias com gradiente muito íngreme (Galvin, 1975).

3.2.2.1 Condições de ondas no litoral de Rio do Fogo

Os pesquisadores da DHI – *Water Environment and Health* têm realizando diversos projetos e estudos costeiros no litoral nordeste do Brasil. Para esses trabalhos, a DHI criou um banco de dados de ondas ao longo da costa brasileira. Desse modo, os dados estatísticos e parâmetros médios de ondas para o período 1970-2009 do litoral de Rio do Fogo, RN, foram disponibilizados para esta pesquisa (informação verbal).²

A DHI gerou três gráficos na frente da costa de Rio do Fogo mostrando as estatísticas calculadas para os parâmetros de onda na área da pesquisa. O primeiro gráfico ilustrado na Figura 3.10 apresenta a altura significativa de onda em metros, H_s (m), enquanto no segundo gráfico (Figura 3.11), observa-se o período de onda T_p (s), e o último gráfico (Figura 3.12) ilustra a direção média de onda (MWD).

As condições de onda apresentadas nesse litoral são a uma profundidade de 20 metros. Na Figura 3.11, o gráfico apresenta que a maior parte da energia de onda ocorre para ondas com altura entre 1,6 m e 1,8 m. Além disso, nota-se também que apenas uma parcela da energia total de onda está representada pelas ondas com alturas maiores do que 3,0 m.

² Tabelas e gráficos fornecidos pelo Dr. Berry Elfrink da DHI– *Water Environment and Health* (empresa na Dinamarca) em 15 de dezembro de 2010.

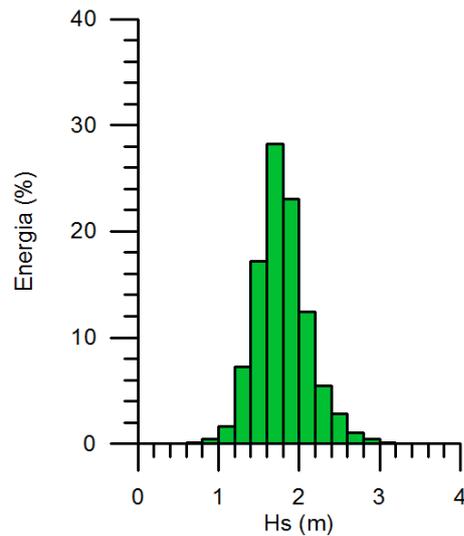


Figura 3.10 – Energia x altura significativa de onda
Fonte: Dados cedidos pela DHI

Na Figura 3.11, ilustra-se o resultado dos cálculos das estatísticas para os períodos de ondas, T_p . A quantidade total de energia de onda foi calculada para vários intervalos discretos de períodos de onda, observando-se que grande parte da energia de onda ocorre para períodos de onda entre 6s e 8s.

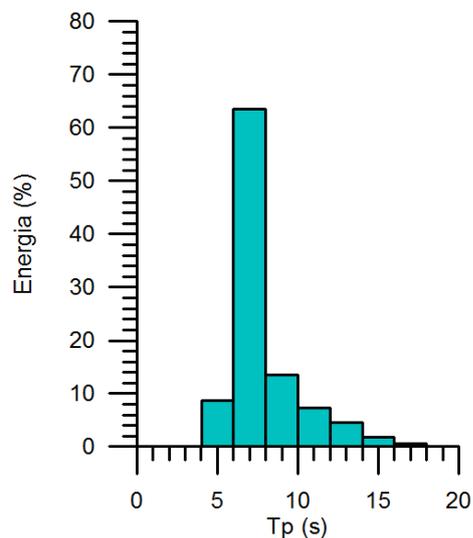


Figura 3.11 – Gráfico representativo da energia x período de onda
Fonte: Dados cedidos pela DHI

Na Figura 3.12, o gráfico mostra a distribuição de energia de onda por intervalo de direção; indica que a direção dominante de ondas a uma profundidade de 20 metros é ESE.

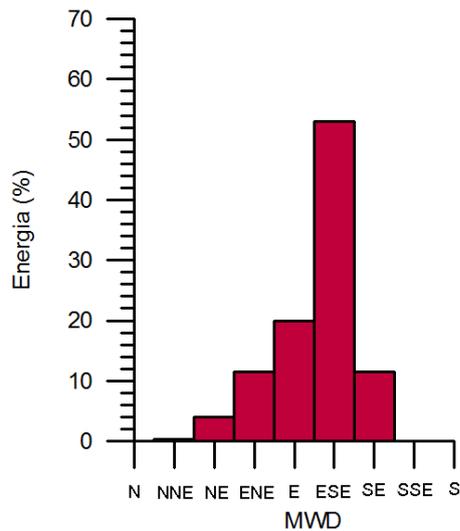


Figura 3.12 – Gráfico representativo da energia x direção média de onda
Fonte: Dados cedidos pela DHI

A estatística anual de onda destaca que o sentido ESE é o intervalo de direção de onda com a maior ocorrência acumulada, como apresentado no gráfico da Figura 3.13 e em forma tabular (Tabela 3.1). Além disso, permite concluir também que as maiores ondas vêm de ESE. Enquanto a Tabela 3.2 mostra estatística anual de ondas próximas à costa: período x direção de onda.

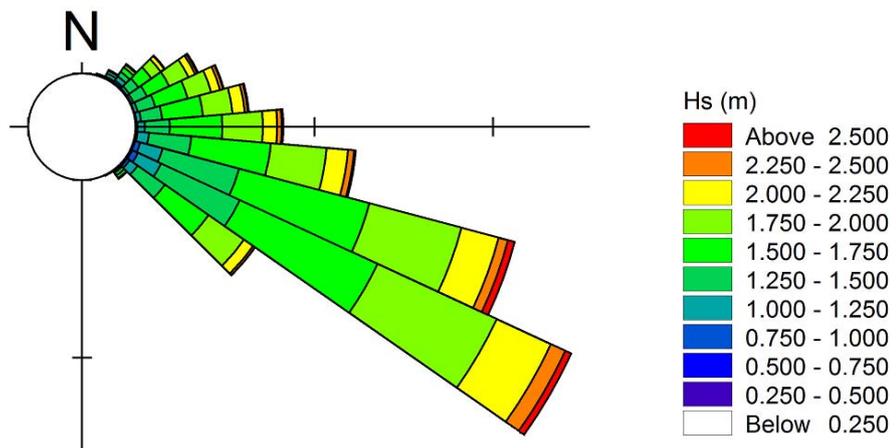


Figura 3.13– Rosa anual de ondas na profundidade de 20 metros
Fonte: Dados cedidos pela DHI

Tabela 3.1 – Estatística anual de ondas próximas à costa: altura x direção de onda

Hs (m)	Direção								Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	
0.00 - 0.20	-	0.001	-	-	0.001	0.001	0.001	0.236	0.24
0.20 - 0.40	0.003	0.007	0.009	0.004	0.007	0.010	0.010	0.003	0.05
0.40 - 0.60	-	0.007	0.030	0.010	0.045	0.074	0.057	0.005	0.23
0.60 - 0.80	-	0.039	0.080	0.022	0.036	0.193	0.129	0.007	0.51
0.80 - 1.00	0.002	0.098	0.147	0.074	0.137	0.645	0.242	0.007	1.35
1.00 - 1.20	-	0.187	0.383	0.248	0.576	1.910	0.482	0.011	3.80
1.20 - 1.40	-	0.139	0.741	1.242	2.131	6.148	1.586	0.004	11.99
1.40 - 1.60	-	0.064	0.982	2.613	4.400	11.083	2.662	0.001	21.80
1.60 - 1.80	-	0.014	1.001	3.262	5.792	14.667	3.564	-	28.30
1.80 - 2.00	-	0.006	0.750	2.152	3.787	9.581	2.273	-	18.55
2.00 - 2.20	-	-	0.279	0.911	1.626	4.689	0.770	-	8.27
2.20 - 2.40	-	-	0.044	0.402	0.614	1.731	0.228	-	3.02
2.40 - 2.60	-	-	0.025	0.167	0.245	0.798	0.063	-	1.30
2.60 - 2.80	-	-	0.015	0.045	0.057	0.272	0.006	-	0.39
2.80 - 3.00	-	-	0.005	0.027	0.026	0.093	-	-	0.15
3.00 - 3.20	-	-	-	0.003	0.005	0.018	-	-	0.03
3.20 - 3.40	-	-	-	-	0.003	0.010	-	-	0.01
3.40 - 3.60	-	-	-	-	0.003	0.003	-	-	0.01
3.60 - 3.80	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
Total	0.00	0.56	4.49	11.18	19.49	51.92	12.07	0.27	100

Fonte: Dados cedidos pela DHI

Tabela 3.2 – Estatística anual de ondas próximas à costa: período x direção de onda

Tp (s)	Direção								Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	
0 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
2 - 4	0.001	0.003	0.008	0.006	0.027	0.068	0.056	0.009	0.18
4 - 6	0.001	0.041	0.120	0.660	2.314	7.758	2.500	0.047	13.44
6 - 8	0.003	0.232	1.296	4.285	9.945	35.545	9.166	0.139	60.61
8 - 10	-	0.223	0.956	2.070	3.042	5.838	0.347	0.051	12.53
10 - 12	-	0.061	0.963	2.030	2.214	1.888	0.006	0.008	7.17
12 - 14	-	0.002	0.768	1.425	1.292	0.635	-	0.009	4.13
14 - 16	-	-	0.301	0.550	0.477	0.164	-	0.010	1.50
16 - 18	-	-	0.075	0.142	0.129	0.026	-	0.003	0.38
18 - 20	-	-	0.003	0.012	0.040	0.003	-	-	0.06
20 - 22	-	-	-	0.003	0.004	-	-	-	0.01
22 - 24	-	-	-	-	0.003	-	-	-	0.00
24 - 26	-	-	-	-	0.001	-	-	-	0.00
Total	0.00	0.56	4.49	11.18	19.49	51.92	12.07	0.27	100

Fonte: Dados cedidos pela DHI

3.2.3 Correntes

A energia dissipada pelas ondas incidentes na linha de costa forma células de circulações ou correntes costeiras. As correntes longitudinais, ou deriva litorânea (*longshore current*), que fluem paralela à praia, são produto da deriva costeira, que atua na zona de surfe e tem sentido paralelo à praia, e da deriva praial, que atua no estirâncio, como transversais (correntes de retorno, *rip currents* ou *rips*). As correntes representam importantes agentes transportadores de sedimentos na zona de surfe (Hoefel, 1998). Enquanto a deriva litorânea é o principal processo responsável pelas migrações laterais das desembocaduras fluviais, lagunares e estuarinas na linha de costa (Villwock *et al.*, 2005).

De acordo com Ferreira Júnior (2005) as correntes do litoral oriental do Rio Grande do Norte são no sentido sul para norte, acompanhando o sentido dos ventos, aliado a indicadores geomórficos da linha de costa.

3.2.4 Marés

As marés são definidas como movimentos periódicos de elevação e abaixamento da superfície dos oceanos, mares e lagos; são provocadas pela força gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra. As marés ocorrem dentro de baías, estuários e lagunas e ao longo das zonas costeiras do planeta. O ciclo lunar produz marés semidiurnas (duas marés altas e duas baixas em aproximadamente 25 horas), ou seja, a intervalos regulares de 6 horas e 12 minutos – a cada 24 horas e 50 minutos. O mar sobe e desce duas vezes, constituindo o fluxo e refluxo das águas, bem visível no Oceano Atlântico (Bird 2001; Woodroffe, 2002).

De acordo com Davies (1964), a latitude geográfica determina diferentes variações de altura de marés, que são classificadas como micromarés (amplitude de maré <2 metros), mesomarés (amplitude de maré entre 2 e 4 metros) e macromarés (amplitude de maré >4 metros). A amplitude de marés é um elemento modelador importante da linha de costa, principalmente em função das correntes que se associam. Essas correntes de maré atuam de forma expressiva no transporte sedimentar costeiro. Segundo Tessler (2005), especialmente no Brasil, as macromarés ocorrem nos estados do Maranhão, Pará e Macapá, modificando a morfologia da linha de costa de forma significativa, atuando com amplitude superior a 4 metros. Do estado de Alagoas ao Rio Grande do Sul, apresenta amplitude de marés inferior a 2 metros (micromarés). Estas têm importância pontual, apenas onde a geomorfologia propicia um aumento da velocidade da corrente de marés. O restante do litoral e alguns trechos do litoral da Bahia apresentam mesomarés com amplitude entre 2 e 4 metros.

Registros de marés na região de Natal apontam para o nível máximo variando de 2,85 a 2,95 m, com nível médio de 1,4 m, enquanto o nível mínimo registrado entre -0,05 a -0,25, caracteriza a maré local como do tipo mesomaré de regime semidiurno, com periodicidade de 12,42 horas (Ferreira Júnior, 2005).

3.2.5 Interação entre fluxos costeiros

Para se elaborar modelos locais da evolução da linha de costa, é necessário definir o fluxo de matéria e energia ao longo do litoral. Isso se faz com a elaboração dos mapas geomorfológicos e geológicos, com a delimitação das morfologias originadas por meio dos processos de transporte, distribuição e deposição dos sedimentos (Meireles, 2009).

De acordo com Meirelles (2009), definiram-se seis tipos de fluxos de energia relacionados com a participação do campo de dunas na regularização de um aporte de areia para a manutenção da dinâmica praial e fluviomarinha. A integração determinou-se por meio da relação dos corpos eólicos com a origem e evolução das falésias, terraços marinhos, campos de dunas móveis e fixas, lagoas costeiras e interdunares, faixa de praia e planícies de marés:

Processo gravitacional – relacionado com o deslocamento de sedimentos na face de avalanche das dunas (setor mais inclinado de uma duna barcana) proporcionado pelo acesso e conseqüente acúmulo de areia proveniente do transporte eólico. Este processo gravitacional que desencadeia o deslizamento de areia foi também evidenciado nas escarpas dos cortes e aterros realizados para a construção de vias de acesso sobre as dunas fixas e móveis;

Deriva litorânea – se dá ao longo do prisma praial e a plataforma continental interna. Está relacionada com o ângulo oblíquo das ondas ao atingirem a linha de costa, devido, principalmente, à fisiografia da zona costeira e a direção preferencial dos ventos provenientes (alísios de este, sudeste e nordeste). Um volume adequado de sedimentos é mantido em deriva litorânea quando as dunas atingem a faixa de praia (através dos promontórios) e os bancos de areia formados nos canais fluviomarinheiros (quando as dunas alcançam a margem dos estuários) são lançados na praia;

Transporte eólico – inicia-se no estirâncio e direcionado para o interior do continente, a favor dos ventos dominantes. A mobilidade das areias pela energia eólica deu lugar a grandes campos de dunas, normalmente instalados sobre os terraços marinhos e o tabuleiro pré-litorâneo. Nos setores onde se produz o **bypass** de sedimentos eólicos, através dos estuários e dos promontórios, atuam como importantes veículos de recarga de areia e continuidade da progradação da planície costeira;

Sistema estuarino – o acesso dos campos de dunas que migram na direção dos canais estuarinos promove a formação de bancos de areia que são transportados para a faixa de praia. Desta forma, é mantido um aporte regulador da dinâmica sedimentar dentro dos canais fluviomarinheiros e na faixa de praia, quando alcançam a desembocadura e daí transportados pelas ondas e correntes marinhas;

Fluxos lagunar e lacustre – as relações entre a sazonalidade climática, a migração dos campos de dunas e as alterações de alta frequência do nível relativo do mar, em grande parte, controlaram a evolução dos sistemas fluvial, fluviomarinheiro e eólico. Os campos de dunas que foram originados durante os eventos regressivos, migraram

sobre os canais fluviais e fluviomarinhos, dando lugar a lagoas e lagoas costeiras. Nos eventos de maior fluxo fluvial, os canais são desobstruídos e novamente conectados com o fluxo fluviomarinho e a faixa de praia. Dinâmica integrada com eventos que levam sazonalmente sedimentos para a linha de costa e, conseqüentemente, a partir da faixa de praia, para a mobilização eólica e formação dos campos de dunas e,

As águas subterrâneas – as características topográficas, climáticas, dos depósitos geológicos (permeabilidade e porosidade das dunas e tabuleiros pré-litorâneos) e morfológicas, originaram as condições geoambientais para vincular o aquífero às lagoas, lagoas interdunares e estuários. As lagoas interdunares alteram sazonalmente suas características morfológicas, área de abrangência e deslocam-se de acordo com o caminhar das dunas. Evidenciou-se que as alterações morfológicas no campo de dunas provocam reflexos no nível hidrostático, alterações no leito sazonal das lagoas interdunares e novas ocorrências sobre o campo de dunas. (Meirelles, 2009, p. 14-18).

Os fluxos relacionados compõem os processos que originam as unidades morfológicas da planície costeira e, especialmente, o campo de dunas em estudo. Proporciona, assim, fonte de sedimentos para a praia e a plataforma continental e ventos competentes para mobilizá-los continente adentro.

De acordo com Meireles (2009), na maré baixa, os ventos transportam parte dos sedimentos sobre o estirâncio para a berma e interior do continente, originando-se as dunas móveis; isso se o volume de areia for suficiente e os ventos tiverem competência para mobilizá-lo. As estruturas dunares ao serem edificadas e com a continuidade do processo de migração – principalmente entre os estados do Rio Grande do Norte e Maranhão –, as que atingem canais fluviomarinhos, são consumidas pela hidrodinâmica estuarina, com os sedimentos originando bancos de areia no leito do canal. Ao alcançarem a desembocadura de estuários e rio, os sedimentos são lançados para a linha de praia, e em seguida o transporte sedimentar é regido pelo sistema de correntes litorâneas (novamente pela ação das ondas, marés e correntes marinhas).

Entretanto, com as dunas migrando sobre os promontórios, logo à frente, os sedimentos retornam à praia, de onde participam do transporte longitudinal proporcionado pelas correntes litorâneas. Os promontórios existentes ao longo do litoral potiguar representam importantes zonas de transpasse de sedimentos (*bypass* de areia). Em razão de o transporte litorâneo desenvolver-se de leste para oeste, os setores representados pela praia, berma, dunas em contato com o estirâncio e campos de dunas imediatamente a oeste dos promontórios foram, em grande parte, edificados pelo fornecimento de areia originadas das dunas que sobrepõem os pontais (Meireles, 2009).

Por meio da relação de interdependência entre morfologias definidas como praia, dunas móveis, canais estuarinos e promontórios, é que se processa parte da dinâmica costeira ao longo do litoral nordestino, com a manutenção de um fluxo contínuo de areia para a faixa

de praia, mediante a participação de sedimentos provenientes dos campos de dunas móveis (Meireles, 2009).

Quando a interferência humana atua modificando a trajetória, a energia envolvida e o volume dos sedimentos em transporte, inicia-se uma nova dinâmica, normalmente regida pelo domínio da erosão. A dinâmica erosiva se intensifica quando grandes volumes de areia – dunas móveis e faixa de praia –, que antes transitavam pela planície costeira, são desviados ou fixados pela expansão urbana, loteamentos mal planejados e construções de *resorts*, impedidos de alcançar a faixa de praia (Meireles, 2009).

3.3 SISTEMA DE MAPEAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)

Mapeamentos topográficos planialtimétrico da elevação da superfície da Terra são empregados em diversas aplicações desde operacionais até científicas. A base cartográfica auxilia no conhecimento geológico e geomorfológico. A topografia, cujo significado etimológico é descrição do lugar, existe há vários séculos – desde os antigos egípcios e gregos –, porém novas tecnologias continuaram a ser desenvolvidas para melhorar a qualidade dos dados topográficos. Inicialmente os mapas de curvas de nível eram constituídos apenas de levantamento em campo.

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 nova tecnologia de alta precisão, notadamente quando o estudo necessita de modelos digitais de elevação com alta densidade de pontos e conseqüentemente alta resolução.

O mapeamento a laser aerotransportado tem diversas denominações, tais como LIDAR, Mapeamento do Terreno por Laser aerotransportado, Mapeamento por laser aerotransportado, Varredura ou 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).

O uso do laser como instrumento de sensoriamento remoto vem sendo aplicado há mais de trinta anos. No período de 1960 a 1970, diversas pesquisas demonstraram o poder do uso do laser em satélites, na percepção lunar, em monitoramentos atmosféricos e estudos oceanográficos. A partir de 1980, o mapeamento a laser passou a ser utilizado também por

aeronaves, a exemplo das missões da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para mapeamento topográfico do gelo ártico – o *Airborne Topographic Mapper* (ATM) e para mapeamento oceanográfico – o *Airborne Oceanographic LIDAR* (AOL). A NASA conduz ainda estudos topográficos em Marte utilizando o *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA), atualmente em órbita ao redor do planeta. Entretanto, apenas nos últimos oito anos, o mapeamento a laser passou a ser usado comercialmente.

A metodologia, 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 & 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 3.14 ilustra como um laser *rangefinder* (telêmetro a laser) varre a superfície registrando os pulsos (distâncias) e as respectivas direções (ângulos).

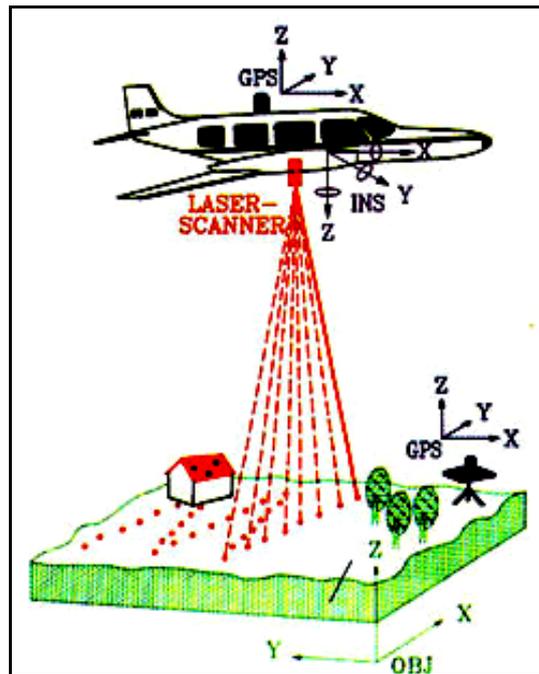


Figura 3.14 – Sistema LIDAR
Fonte: Harding (2002)

A fim de corrigir os movimentos da aeronave, no pós-processamento, geram-se e gravam-se pelo sistema de medição inercial as atitudes referentes a cada distância medida (atitude é a posição do sensor no espaço, caracterizada pelos chamados ângulos de *Euler*).

O posicionamento da aeronave realiza-se por GPS mediante dois receptores, um instalado na aeronave e outro no terreno permitindo a correção diferencial e o refino das coordenadas. Durante a realização do voo, os dados gerados combinam-se e determinam a posição precisa dos pontos de terreno. A precisão nominal do sistema é de cerca de 10 a 20 cm emq (emq – erro médio quadrático) para altimetria e o fator $h/2000$ (onde h é a altura de voo em metros) para planimetria, ou seja, para altura de voo de 1.000 m, o emq para planimetria esperado é de 50 cm (Santos & Mitishita, 2005) referente a Maas (2003).

O *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) é um raio de luz que percorre uma direção e, ao se chocar com uma partícula, dispersa-se em todas as direções; parte retorna à direção de origem sendo capturado pelo sensor. A intensidade do sinal pode determinar o tempo de voo do momento de transmissão do pulso até a recepção do eco originado pela interação do laser com a substância ou o objeto de contato (Rivas & Brito 2003).

O processo tem como princípio básico o tempo de emissão, e o retorno de um pulso de laser se denomina *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e permite capturar diversos tipos de

informação sobre a superfície. Por exemplo, por meio do valor de I, intensidade, pode-se diferenciar um veículo de um telhado localizado embaixo de uma árvore.

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 3.15. 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.

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 como os dados são coletados e processados. Com uma massa de dados representativa da superfície de interesse processada, obtém-se o Modelo Digital do Terreno.

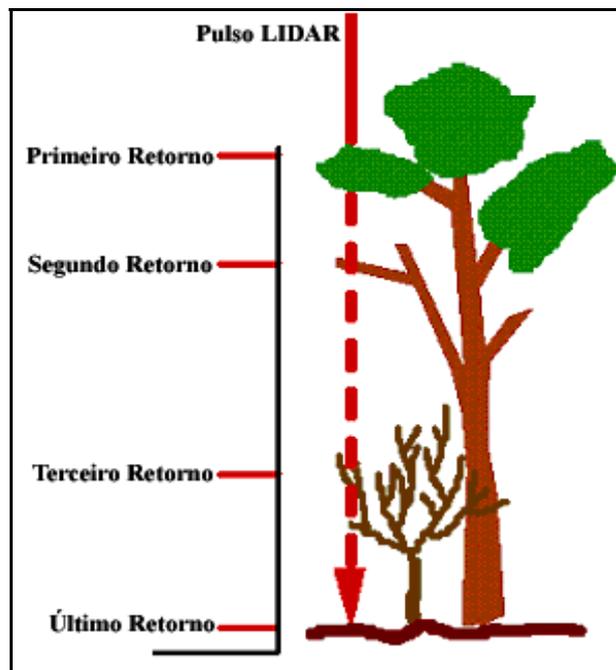


Figura 3.15 – Seleção de retornos LIDAR
Fonte: Harding (2002)

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). No entanto, uma grade desse tipo também pode ser gerada com o emprego de técnicas como a taqueometria e aerofotogrametria tradicionais e, mais recentemente, com a interferometria por radar – *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (IFSAR).

No Quadro 3.2, segundo Brandalize (2004), apresenta-se uma comparação entre os métodos tradicionais e LIDAR (ALS) com relação à capacidade de coletar dados de elevação, as características gerais que permitem distinguir a técnica de mapeamento a laser aerotransportado das técnicas aerofotogramétrica e IFSAR.

Quadro 3.2 – Mapeamento a laser aerotransportado x aerofotogrametria x IFSAR

CARACTERÍSTICAS		ALS	AERO FOTO	IFSAR
Sensor	Ativo	X	-	X
	Óptico	X	X	-
	Imageador	-	X	X
	Exige calibração periódica	X	X	X
Altitude de voo	Baixa (até 5 km)	X	X	X
	Média (5 a 10 km)	-	X	X
	Alta (acima de 10 km)	-	(1)	X
Dados	Georreferenciados (POS)	X	(2)	X
	Coletados digitalmente	X	(3)	X
	Processados automaticamente	X	(4)	X
	Podem ser integrados aos dados obtidos por outras técnicas	X	X	X
Obstáculos	Condições climáticas (vento, nuvem, chuva, névoa, neve)	X	X	(5)
	Inclinação do sol	-	X	-
	Uso noturno	-	X	-
Problemas	Provoca áreas de sombra em razão da inclinação do sinal emitido	X	-	X
	Na presença de declividades intensas	-	X	X
Uso restrito	Em áreas de vegetação densa	-	X	X
	Em áreas urbanas densamente edificadas	-	-	X
	Em regiões costeiras e em regiões cobertas por gelo ou neve	-	X	-
	Em áreas alagadas	(6)	-	-
Apropriada	Para a cobertura de grandes áreas do terreno	-	X	X
	Para a cobertura de faixas estreitas do terreno	X	X	-

Fontes: Baltsavias (1999); Kim *et al.* (2000); Slatton *et al.* (2000); Hensley *et al.* (2001); Mercer (2001); Burtch (2002)

Nota: Sinais convencionais utilizados: X Sim; - Não.

(1) Não convencional.

(2) e (3) Aplica-se ao emprego de câmaras métricas digitais (prática ainda bastante restrita).

(4) Depende do método empregado e do produto gerado.

(5) Existem divergências entre autores quanto à sua capacidade de penetrar nuvens.

(6) Pesquisas provam excelentes resultados em áreas sem sedimentos em suspensão.

A geração de modelos digitais por meio da técnica IFSAR aerotransportada é mais recente e restrita que o LIDAR. A interferometria por radar é uma técnica de mapeamento por sensoriamento remoto que combina os radares de abertura sintética (SAR) tradicionais a técnicas interferométricas desenvolvida pela comunidade científica de radioastronomia (Hensley *et al.*, 2001). As diferenças básicas entre as técnicas IFSAR e o mapeamento a laser aerotransportado são o tipo de onda emitida pelos sensores (microondas x laser) e o método empregado na obtenção das altitudes dos pontos que compõem a superfície do terreno – antenas x Laser Rangefinder (LRF). Segundo Hensley *et al.* (2001), apenas três dos sistemas IFSAR em operação no mundo são aerotransportados (os sensores espaço transportados são em maior número e vêm coletando imagens e dados de elevação desde a década de 1980).

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 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).

O método de autocorrelação é automático e foi desenvolvido com base no processamento de imagens digitais (obtidas diretamente por meio de câmaras digitais, ou, por meio da digitalização do filme utilizando *scanner* fotogramétrico), porém, seu uso apresenta restrições em razão do tempo (pós-processamento) requerido para a edição dos modelos digitais gerados (sua maior desvantagem).

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.

A grande maioria do mapeamento topográfico no mundo (99%), segundo Petrie (2000), executa-se com câmaras aerofotogramétricas convencionais (analógicas). Os produtos advindos do emprego dessa técnica ainda são considerados padrão no julgamento dos produtos gerados com o emprego de outras técnicas, como o mapeamento a laser aerotransportado e o sistema IFSAR.

3.3.1 Fontes de erro

Nesta pesquisa aborda-se apenas a fonte de erros da análise posicional, as coordenadas, dos dados LIDAR, ou seja, não se levantarão erros no planejamento e na execução da missão de voo, bem como o processamento dos dados.

Segundo Crombaghs *et al.* (2000), os erros nas coordenadas tridimensionais LIDAR normalmente têm origem no sistema de orientação do sistema (GPS, INS ou GPS e INS combinados, ou ainda na integração desses componentes). Essas fontes de erro podem ser agrupadas em quatro categorias: por ponto, por erro nas observações GPS, por faixa (produzida pela varredura contínua do sensor aerotransportado), por bloco (oriunda da junção das faixas). As diversas fontes e tipos de erro que ocorrem no sistema LIDAR, apontadas por Behan *et al.* (2000), ilustram-se no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Principais fontes de erros no sistema LIDAR

GPS	INS	LASER	INTEGRAÇÃO
Refração Ionosférica	Derivas no giroscópio	Espaçamento entre os pontos no terreno	Sincronismo dos sistemas
Fixação das Ambiguidades	Alinhamento em relação ao campo gravitacional terrestre	Tipo do terreno (cobertura e inclinação)	Transformação entre os sistemas
Interpolação		Calibração	Transformação de coordenadas

Fonte: Behan *et al.* (2000)

De acordo com Maas (2003), relatado por Brandalize (2001), algumas das principais fontes de erro que afetam os dados LIDAR são:

- a) a grande maioria dos sistemas LIDAR comercializada atualmente tem cada distância respectiva a cada pulso emitido e recebido, e depende da qualidade dos sistemas de medição de tempo ou dos sistemas medidores da fase da onda portadora;
- b) o tipo e inclinação da superfície que reflete o pulso laser;
- c) erros oriundos do funcionamento dos sistemas mecânicos que controlam o espelho (controlador do feixe de varredura), vibrações e oscilações dos sistemas componentes LIDAR, ou de toda a aeronave;
- d) as posições da aeronave e do sistema de varredura são determinadas por técnicas de posicionamento GPS, portanto dependente da constelação GPS (o erro altimétrico é normalmente maior que o planimétrico no posicionamento por GPS);
- e) os sistemas INS e GPS se integram visando à interpolação e suavização dos parâmetros definidores da trajetória tridimensional a que está sujeita a origem do sistema LIDAR (atitude do sistema); erros aleatórios ou derivas não compensados no INS conduzem a erros na orientação da plataforma, por conseguinte, conduzem a erros em planimetria;
- f) erros sistemáticos, por imperfeições de montagem (off-sets) dos diversos integrantes do sistema LIDAR entre si, bem como falhas de sincronização entre estes, conduzem a erros sistemáticos no posicionamento por LIDAR;
- g) erros causados pela transformação de coordenadas, desde os sistemas internos até os de interesse do usuário – por exemplo, ao sistema SAD69 para planimetria e altitude ortométrica ou ao SIRGAS2000 e altitude ortométrica, ambos os sistemas oficiais e integrantes do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB);
- h) propagação do erro na determinação das coordenadas da origem do sistema LIDAR, em razão da dependência linear entre a geração de coordenadas planimétricas por LIDAR e a altura de voo da aeronave; essa dependência linear é menos relevante para altimetria (a distância inclinada varia entre 2 a 3 cm).

3.3.2 Custo x tempo

A fim de estabelecer uma análise comparativa entre diversas tecnologias da geoinformação, elaborou-se a Tabela 3.3 levando em consideração as seguintes variáveis:

método, forma de obtenção, tempo de execução, precisão e resolução e custo total MDT por km².

Tabela 3.3 – Precisões, tempo de execução, resoluções e custo da aquisição de um MDT por km² por fotogrametria, imagens de satélites, topografia e LIDAR

Método	Obtenção	Tempo de Execução (hora/ km ²)	Precisão/Resolução Espacial	Custo Total MDT /km ²
MDE por Fotografias aéreas	aeronave	*	0.5 – 0.25m / 3 – 10 cm	U\$ 50 a 1.000
MDE por Ortofotocarta	aeronave	*	10cm – 1 m/ 5cm	U\$ 200 - 500
Imagens de satélites spot	Satélite	*	2,5m / 10 metros no modo Pancromático e de 20 metros no modo Multiespectral.	U\$ 20- 100
Imagens de satélites landsat	Satélite	*	15 m (pancromático) e 30 m (multiespectral)/ 20 - 30m	Não gera MDE
Imagens de satélites QuickBird	Satélite	*	2m/ 2,4 a 2,8 m	U\$ 20 – 100
Imagens de satélites Geoeye	Satélite	*	0,5 a 1,54 m/5m	U\$ 10 – 100
Imagens de satélites WorldView-2	Satélite	*	6,5m /50cm	U\$ 50 – 100
Imagens de satélites IKONOS	Satélite	*	1 metro de resolução ate 1:2500	U\$ 50 – 100
Imagens de satélites ALOS **NÃO TEM INTERFERENCIA DE NUVENS	Satélite	*	10-15m /2,5metros	U\$ 50 – 100
Levantamento topográfico	Estação total	*	2 cm ou melhor	U\$ 11.000
LIDAR aerotransportável	aeronave	10 horas/km	3- 15 cm**	U\$ 90 a 500

* Depende da disponibilidade de imagens e porcentagem da presença de nuvens média e acessibilidade para coleta dos pontos de controle.

**Em superfícies homogêneas como em áreas de geleiras, desertos e dunas o mapeamento a laser tem excelentes respostas e precisão. O que usualmente apresenta dificuldades durante as medições fotogramétricas e captação de imagens de satélite pela falta de pontos identificáveis.

Fonte dos custos coletadas por telefone, e diversos sites, tais como Maplanbrasil, GEOID, Maplan, QuickBird, Ikonos, RapidEye, WorldView 2, ALOS. Spot, Landsat entre outros.

A finalidade das tecnologias listadas na Tabela 3.3 é semelhante, ou seja, geram informações sobre a superfície terrestre por meio de mapas, modelo digital do terreno e considerada fundamental na compreensão da dinâmica de uso e ocupação do solo, no planejamento, monitoramento de questões ambientais entre outras. Na geologia, aplicam-se para diversos fins, tais como identificação de falhas e lineamentos geológicos, identificação de afloramentos rochosos, identificação de estruturas geológicas, monitoramento de linha de costa e perfil praias, vulcões entre outros, diferenciação entre tipos de solos e rochas, discriminação de produtos de alteração hidrotermal, monitoramento de processos erosivos de origem fluvial e/ou eólica, detecção de mudanças em cursos de água e sistemas costeiros, entre outros.

A diferença, entre as diferentes tecnologias, está no nível de precisão ou acurácia que o mapa cartográfico necessita. As imagens de satélite Quick Bird e Geoeyes por exemplo, têm 0,6 m de resolução, ou seja, cada pixel dessa imagem representa no terreno 0,6 m x 0,6 m, isto é, 0,36 m². Já as fotografias aéreas, podem gerar produtos com resolução muito superiores, com até 0,1 m de resolução, bastando para isso abaixar a altura de voo e a quantidade de pontos de controle no terreno. Portanto, a aerofotogrametria é indicada para projetos mais precisos nas escalas 1:20.000 a 1:500, e as imagens de satélite são indicadas para projetos que exijam menos precisão nas escalas 1:250.000 a 1:25.000, com exceções da Quick Bird, Geoeyes, spot que podem ser usadas para escala até 1:5.000. O satélite ALOS atende bem as escalas de até 1:25.000.

Na escolha da melhor tecnologia a ser empregada em uma pesquisa, necessita-se observar o melhor custo-benefício e a maior qualidade devendo ser analisada numa perspectiva de que cada estudo tem especial demanda e necessidades diferentes, e que deve ser feita dependendo de diversos fatores, tais como precisão, orçamento, resolução, prazo e escala de detalhamento que atenda o projeto.

De acordo com Cordovez (2004), a melhor alternativa a se adotar na elaboração ou atualização da base cartográfica de determinado projeto deve considerar a precisão do trabalho requerido e a disponibilidade de recursos financeiros.

Assis (2001) cita a possibilidade de substituição da aerofotogrametria por imagens de satélite de alta resolução; entretanto, ressalta que a aerofotogrametria também está evoluindo, principalmente com a utilização de câmeras digitais, o que reduziria em muito os custos com esse processo, favorecendo a permanência dessa tecnologia no mercado.

Nesta pesquisa, de acordo com orientação de Delara (2005), por falta de legislação própria para levantamento LIDAR no Brasil, foram adotados os aspectos utilizados para

classificação de cartas conforme sua exatidão do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) – regimentada no Brasil pela Comissão Nacional de Cartografia (Concar), pelo Decreto n.º 89.817, de 20 de junho de 1984 – Normas Cartográficas, que tem instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia Nacional (Brasil, 1984).

Capítulo II – Seção 1 Classes de Cartas, Artigo 8 diz o seguinte:

[...]

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico – estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico – estabelecido.

[...]

§ 4.º Para efeito das presentes instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Capítulo II – Seção 2 Classes de Cartas, Artigo 9 diz o seguinte sobre os critérios para classificação de uma carta como Classe A:

[...]

- Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico, 0,5 mm na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o erro padrão correspondente; - Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico, metade da equidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o erro padrão. (Brasil, 1984).

Verifica-se que o levantamento LIDAR se enquadra no Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrica Classe A para escala de representação de 1:1500 e pretensamente para altimetria o Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrica Classe A para escala de representação de 1:500, considerando equidistância das curvas de nível de 0,5 m.

Atualmente, a associação de duas tecnologias (fotografias áreas/ortofotocarta e LIDAR) traz excelentes resultados e precisão atendendo diversos projetos executivos, como barragem, hidrelétricas, rodovias entre outros.

No caso do mapeamento a Laser, por se tratar de uma tecnologia recente e não ter um mercado estabilizado, existem muitas interpretações para os preços. Cada provedor de serviço tem meios diferentes de calcular os custos, e os preços internacionais variam de US\$ 90 a 500/ km², em virtude da dimensão da área, densidade de pontos, tipo de pós-processamento, custos extras para mobilização, plataforma, entre outros (Haala, 1999).

Ademais o mapeamento a laser aerotransportável, por sua aquisição digital de dados e medida direta, propicia a obtenção de um MDT de maneira mais rápida que a fotogrametria, imagens de satélite e topografia.

3.3.3 Aplicação

No Brasil, são incipientes os estudos desta tecnologia aplicada a Geociências, porém no Canadá e nos Estados Unidos, encontram-se diversos estudos, entre outros, a investigação de Mitsova *et al.* (2002a) do *Department Marine, Earth, and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695 – USA*, na Baía de Head Island, intitulada “Análise espaço-temporal da morfologia praial usando LIDAR, RTK-GPS e o Sistema de Informação *GRASS GIS*”. Segundo Fowler (2001), a utilização dos dados de mapeamento a laser aerotransportado é apenas limitada pelas necessidades, imaginação e disponibilidade de *softwares* dos usuários.

Relacionam-se a seguir as aplicações atualmente pesquisadas para os produtos provenientes do emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado, LIDAR.

3.3.4 Meio ambiente

Na avaliação e análise ambiental, podem-se relacionar estudos relativos a: (1) a alteração climática, elevação do nível do e derretimento de geleiras; (2) danos provocados por inundações, terremotos, maremotos, furacões, entre outros, relativamente à sua magnitude e extensão; (3) riscos, principalmente os referentes a inundações e incêndios. Modelos digitais de superfície e de elevação são utilizados, pelos planejadores governamentais, tanto do ponto de vista local (urbano ou rural) como do ponto de vista regional, no estudo de tais riscos e no desenvolvimento de planos de prevenção. Outros riscos normalmente analisados por meio da técnica de mapeamento a laser aerotransportado são os de erosão e de deslizamento de encostas.

Hopkinson (2006) comprova que monitoramento temporal das geleiras por meio do LIDAR aéreo é um relevante e preciso indicador das mudanças climáticas. Para tanto, a pesquisa comparou Modelos Digitais de Elevação (MDE) durante o período de 2000 e 2002 utilizando dados LIDAR aéreo para quantificar a variabilidade total e espacial na superfície *downwasting* (ou crescimento) dentro de ambientes glacial e periglacial das montanhas canadenses denominadas *Rocky Mountains*. A pesquisa confirma todas as previsões das mudanças climáticas atuais e demonstra que houve uma redução no volume total de 33×10^6 m³ ao longo das Morenas Peyto. Comprovando, ainda, a importância dessa tecnologia no monitoramento do derretimento das geleiras. Fornece dados de alta precisão (na ordem de

centímetros) que subsidiam os tomadores de decisão e pesquisadores a nortear suas estratégias políticas e seus estudos no sentido de melhorar a sustentabilidade do planeta.

Webster (2006) enfatiza a importância do uso do LIDAR aerotransportável na construção de um Modelo Digital de Elevação e Modelo Digital de Superfície de alta precisão, para construção de mapas de risco de inundação em toda a província de New Brunswick – Canadá. Esses mapas foram construídos utilizando rotinas do sistema de informação geográfica, o qual determinou a extensão ou amplitude espacial da inundação de um determinado nível de água, por exemplo: para os níveis de água em incrementos de 10 cm de 0 a 4 m acima do nível médio do mar. Essa simulação e animação permitem ao poder público (equipe de emergência dos Bombeiros da província, entre outros órgãos) elaborar com antecipação medidas emergenciais de remoção da população nas áreas de risco da inundação na enchente do Rio St. John em 2008, conforme ilustrada na Figura 3.16. Outra aplicação elucidada na pesquisa é a utilização em estudos de avaliação do impacto socioeconômico e do ecossistema.

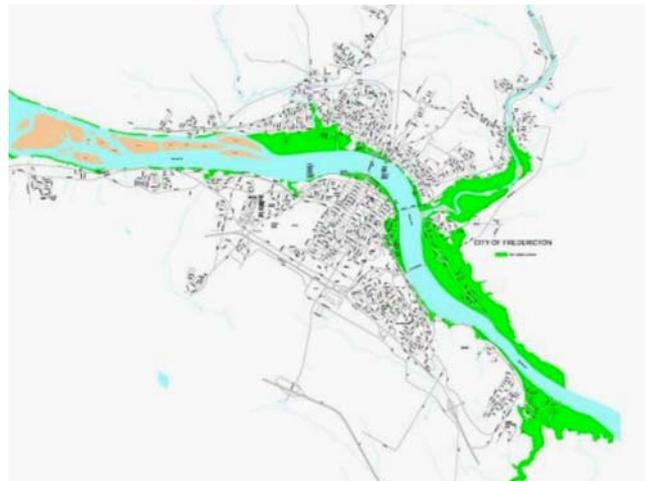


Figura 3.16 – Mapa de áreas da cidade de Fredericton com risco de inundação em uma simulação com o nível do Rio St. John atingindo 8,5 metros
Fonte: Fredericton (2010)

Daigle *et al.* (2006), no estudo do governo do Canadá intitulado *Impacts of Sea Level Rise and Climate Change on the Coastal Zone of Southeastern New Brunswick*, enfatizam a importância dos dados gerados pela tecnologia LIDAR melhor conhecimento das condições ambientais da costa sudeste da província subsidiando estudos para consolidar estratégias e ações mitigadoras quanto ao impacto da elevação do nível do mar nessa costa canadense.

Os dados de LIDAR também foram utilizados para avaliar o potencial de progradação e a erosão das dunas no *spi* (esporão) das dunas de Bouctouche. Isso mostrou uma alta vulnerabilidade aos danos da tempestade ao *habitat* do local. Diversos mapas foram

elaborados utilizando dados LIDAR que atualmente então disponíveis para subsidiar o poder público na elaboração de estratégias mitigadoras direcionadas à preservação ambiental da área.

3.3.5 Mapeamento topográfico

Dentre as aplicações relacionadas com o mapeamento topográfico, destacam-se:

- a) corredores ou feições lineares como estradas (rodovias e ferrovias), linhas de transmissão de energia e dutos (gás e óleo); a técnica tem sido empregada também no estudo do potencial hidrelétrico de bacias hidrográficas, levantando feições hidrográficas lineares como vales de rios;
- b) em zonas costeiras, principalmente em estudos das praias e dunas, na análise da topografia, dos perfis, da estrutura e dos processos de transporte de sedimentos, proporcionando vantagens em relação ao emprego da técnica fotogramétrica tradicional, dificultado pelo relevo quase plano e pela homogeneidade (pouco contraste) característica daquelas feições (Flood, 2000);
- c) em áreas de floresta densa, segundo Fowler (2001), o emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado se destaca no sentido do gerenciamento dos recursos naturais e para a indústria florestal. Essa técnica permite obter informações acuradas sobre a altura da vegetação e sua densidade (distribuição espacial). Os sistemas capazes de captar mais de dois retornos por pulso, ou, até mesmo, de captar o feixe laser emitido na forma de uma onda contínua, são especialmente úteis na determinação de algumas das principais características estruturais da vegetação como altura, diâmetro, espécie, estimativa de biomassa, volume e condição das árvores (Andersen *et al.*, 2004), fornecendo dados para diversos estudos, por exemplo, o preparo de inventários florestais e simulação da remoção virtual de cobertura vegetal;
- d) áreas urbanas, onde se utilizam modelos digitais de superfície na geração de ortofotocartas e em outros estudos como os realizados pela indústria das comunicações, relativamente à definição de áreas de sombras nas simulações de propagação de ondas eletromagnéticas, ou ainda, nas simulações do impacto de ruídos em edificações que cercam uma rota de tráfego planejada. Assim como em simulação de demolição de grandes obras de engenharia permitindo a análise de alteração da paisagem;

e) telecomunicações na obtenção de modelos de elevação que permitam estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras.

Na aplicação da tecnologia, em áreas costeiras, pode-se destacar os estudos desenvolvidos por Mitasova *et al.* (2002a), já citado, e (2002b) – Monitoramento Espaço-Temporal da Evolução Topográfica Usando LIDAR, *Differential Global Positioning System* (DGPS) e Dados de Sonar. A metodologia empregada conjuga o estudo do monitoramento temporal da evolução da morfologia praial usando Sistema de Mapeamento a Laser LIDAR aliado ao Sistema de Informações Geográficas, GPS Cinemático em tempo real e dados de sonar, conforme ilustra a Figura 3.17.

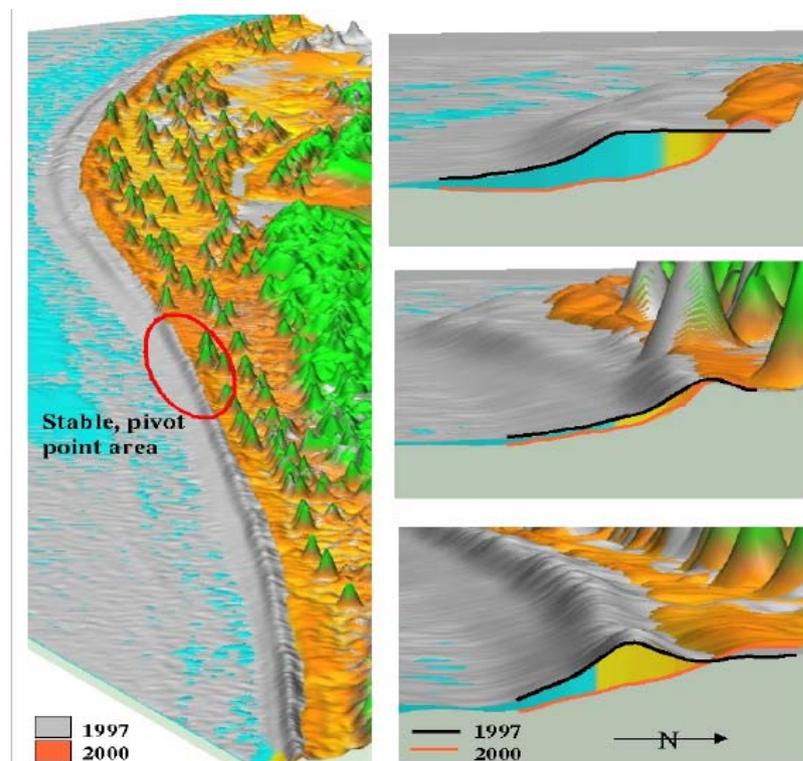


Figura 3.17 – Modelo digital do terreno na superfície sul da praia 1997-2000

Nota: coberto 1997 (cinza) e 2000 (colorido) LIDAR – base ou MDT com área estável destacada do ponto do pivô; alteração típica na parte ocidental, central e leste das seções. A cor azul nos perfis mostra a posição da linha d'água em 2000.

Fonte: Mitasova (2002b, p .3)

Na Figura 3.18, observa-se a aplicação do mapeamento a laser aerotransportado na Praia de Piedade, próximo ao Hospital da Aeronáutica, Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil. Mapeamento tanto da parte emersa quanto da submersa da praia. Destaca-se que essa tecnologia é atualmente a única que permite mapear essa área de interface terra-mar.

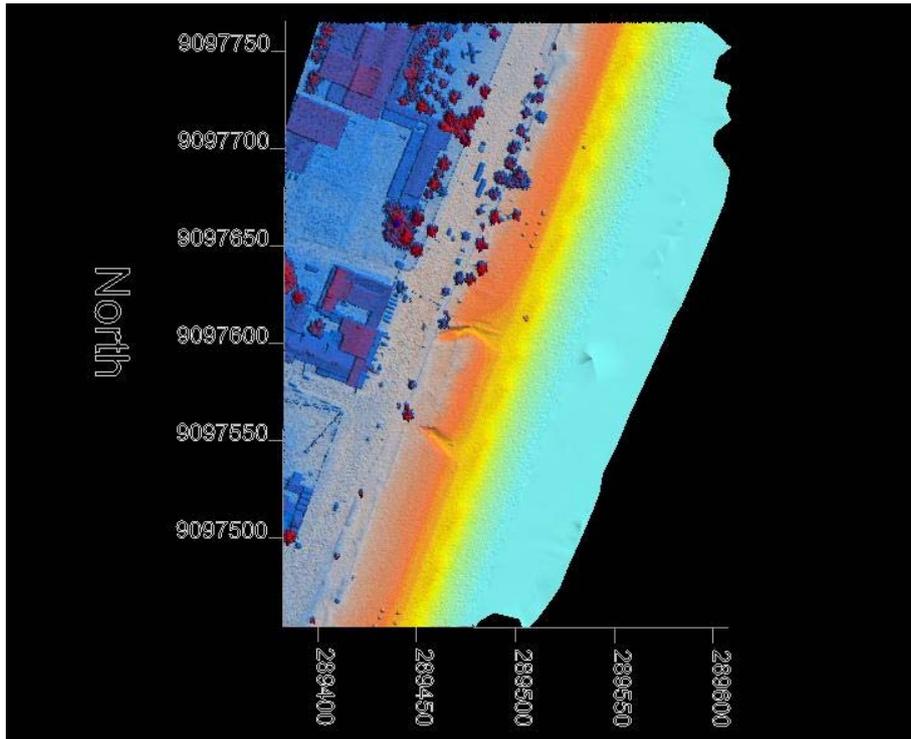


Figura 3.18 – Mapeamento da área de interface terra-mar, Praia de Piedade, Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco
 Fonte: Autoria própria; voo da Geoid (fevereiro, 2007)

3.3.6 Processamento de imagens

O processamento de imagens ainda é incipiente, está em desenvolvimento, mostrando grande potencial. A extração e classificação automática de feições tem sido o principal objetivo de tais estudos (Figura 3.19). Outras aplicações incluem, ainda, pesquisas recentes na área da exploração mineral (determinação do volume de material escavado), da arqueologia (mapeamento de ruínas) e da análise e monitoramento do tráfego em estradas (contagem de veículos e cálculo do volume de tráfego).

O emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado, nas aplicações descritas, geralmente vem acompanhado do emprego (simultâneo, prévio ou posterior) de alguma outra técnica de imageamento, como a aerofotogramétrica, que utiliza câmaras métricas analógicas para o levantamento detalhado da superfície do terreno.

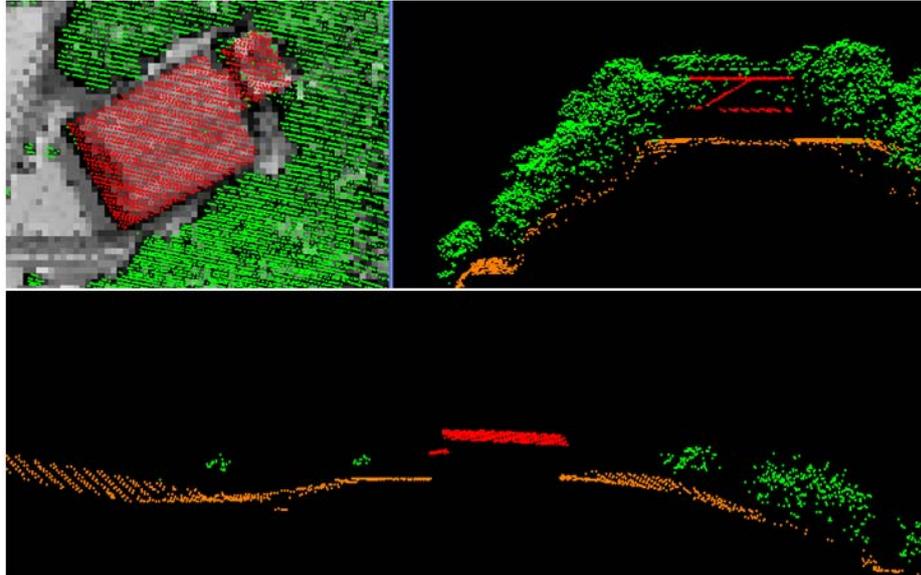


Figura 3.19 – Aplicação na classificação de edificações, vegetação e terreno
 Fonte: Arquivos da Empresa Geoid Laser Mapping (2006)

A Figura 3.20 mostra o Modelo Digital de um recorte do bairro de São José, no Recife (Pernambuco, Brasil), ilustrando a visualização e simulação da retirada do viaduto das cinco pontas em diferentes ângulos de observação.

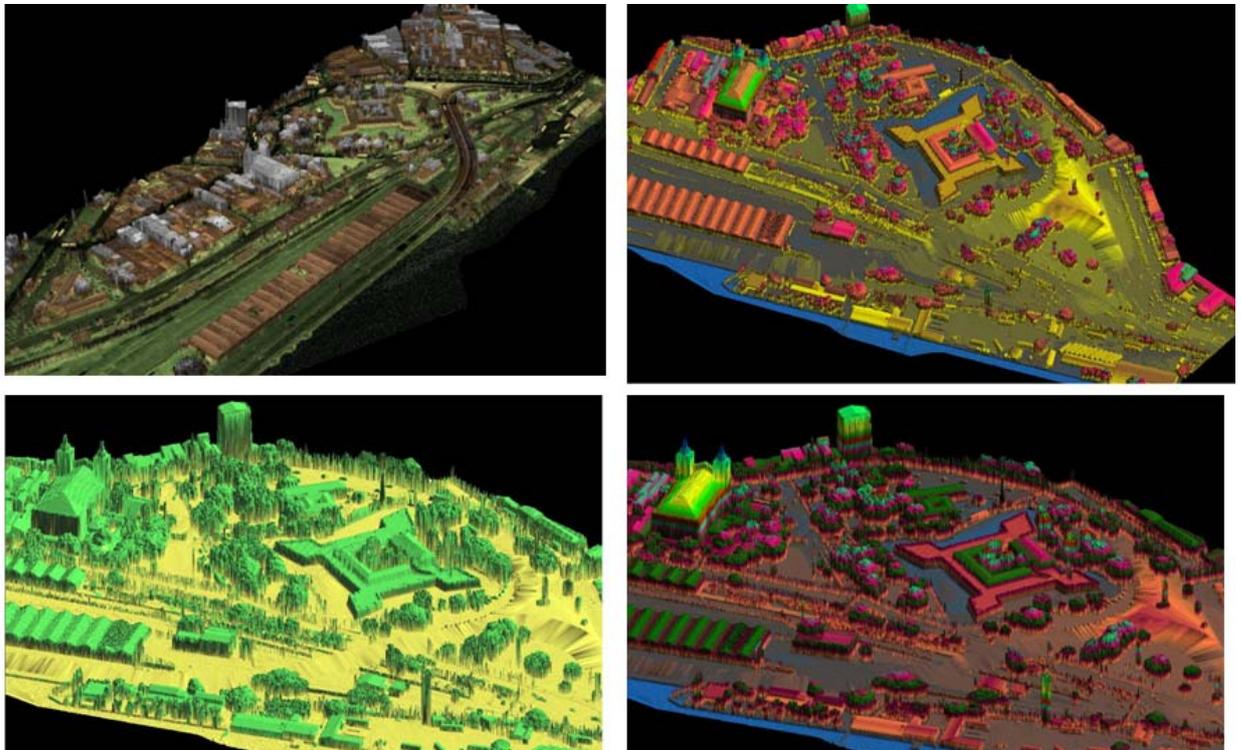


Figura 3.20 – Modelo digital de um recorte do bairro de São José, Recife, PE, Brasil
 Fonte: Arquivos da Empresa Geoid Laser Mapping (2006)

3.4 GESTÃO COSTEIRA E MONITORAMENTO CARTOGRÁFICO

Segundo o *World Travel and Tourism Council* (WTTC), o turismo é a maior indústria do mundo (Goeldner *et al.*, 2002). Estima-se que em 2010 essas atividades contribuem com US\$ 8.008 bilhões de Produto Interno Bruto (PIB), gerando empregos para aproximadamente 328,4 milhões de pessoas em todo mundo em 2010. Graças ao grande retorno financeiro que essa atividade proporciona, os gestores de todos os países incentivam a indústria do turismo.

O Governo do Rio Grande do Norte desenvolveu estratégia de desenvolvimento para todo o estado. O município de Rio do Fogo está incluso no Plano de Desenvolvimento Integrado do Turismo Sustentável do Polo Costa das Dunas do estado (PDITS, 2001). Esse plano apresenta as ações voltadas ao fomento do turismo. Torna-se fundamental para o êxito do plano, a busca da qualidade na prestação de serviços e o correto gerenciamento dos recursos naturais e culturais, por parte de todos os atores envolvidos no processo, quer sejam de natureza pública, quer de natureza privada. Constata-se, assim, a imensa pressão do processo de ocupação antrópica existente sobre o campo de dunas, tornando-se ambientalmente vulnerável, de um lado pela população local, atraída pela beleza paisagística e a valorização costeira, procura ocupar essa área,;por outro lado, o capital da indústria do turismo procura ocupar essa área para investir em lazer, hotéis e *resorts*.

Segundo Dias *et al.* (2009), para melhorar o complexo processo de gestão integrada das zonas costeiras, é fundamental: estimular a pesquisa científica para subsidiar as ações e decisões dos gestores públicos; contar com o comprometimento e a responsabilização partilhada do cidadão “dando-lhe acesso à informação, sensibilizando-o para a importância desta problemática e integrando-o em todo o processo decisório” (Dias *et al.*, 2009, p. 5); adotar uma abordagem sistêmica que promova uma visão interdisciplinar e integradora); implementar estudos de monitoramento contínuo empregando metodologias uniformes e abrangentes de maneira que possibilite conhecer as tendências evolutivas dos diferentes ambientes costeiros; promover a pesquisa científica de maneira a ampliar o conhecimento de base que permita melhor compreender os processos e o funcionamento dos sistemas costeiros; avaliar de forma sistemática o próprio processo de gestão costeira direcionado a adotar medidas mitigatórias nos procedimentos que se revelem menos adequados e introduzir outros mais adaptados às modificações ambientais; além de tudo, empregar o Princípio da Precaução usando atitudes cautelares diante da deficiência do conhecimento científico. Dias *et al.* (2009, p. 5) diz que se faz necessário “ampliar o nível de sustentabilidade da exploração desse

enorme recurso marinho que são as zonas costeiras, deste modo promovendo a solidariedade inter-geracional.”

A gestão integrada das zonas costeiras é um processo complexo, longo, difícil e interativo. Em nenhuma zona costeira, existem boas e eficientes soluções (ou modelos de sucesso) que possam ser transplantadas inteiramente para outras regiões. Por outro lado, “se procuram soluções através de um processo tateante, com frequência utilizando o princípio da tentativa e erro” (Dias *et al.*, 2009, p. 5). Cada zona costeira tem especificidades (oceanográficas, econômicas, climáticas, culturais, geológicas, sociais, sedimentológicas, paisagísticas entre outras) que a distinguem de todas as outras.

As pesquisas comprovam que só se pode gerir bem o que se conhece bem; e de acordo com Dias *et al.* (2009, p. 5) “quanto maior for o conhecimento de um sistema maior pode ser a eficácia das medidas de gestão”. Consequentemente, mapear e monitorar as zonas costeiras de alta vulnerabilidade ambiental.

Atualmente, em diversos estudos costeiros, vem sendo utilizada a tecnologia LIDAR com resultados de grande contribuição à gestão costeira, tais como Pardo-Pascual *et al.* (2005), com desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagem direcionados a necessidades de atender estudos que subsidiam a gestão costeira; Mitsova *et al.* (2005), no que diz respeito ao uso da imagem de intensidade, possibilitou melhor reconhecimento dos contornos do campo de dunas, assim como a vegetação nas bordas das dunas; Nagihara *et al.* (2004) mostram as vantagens dessa tecnologia com relação à aquisição de modelos digitais de Terreno no monitoramento temporal das dunas. A pesquisa de Saye *et al.* (2005) mostra a grande densidade de pontos LIDAR que possibilita mapear morfologia de praia e permite também a classificação com alto nível de precisão dos trechos das praias que estão experimentando erosão ou acreção; Webster *et al.* (2004) estudam a previsão de avanço do mar; Bates *et al.* (2003) apresentam modelos de alta resolução da topografia das margens do rio; e Burroughs e Tebbens (2008) mostram alterações das dunas costeiras.

A compreensão da evolução temporal da zona costeira, a identificação de áreas sensíveis às altas taxas de erosão, o mapeamento do volume de elevação e o deslocamento dos sedimentos são indicadores e dados fundamentais para subsidiar o ordenamento do litoral (Stockdon *et al.*, 2007; Houser *et al.*, 2008.; Saye *et al.*, 2005). Estudos anteriores demonstraram a importância de pesquisas direcionadas em avaliar as alterações do ambiente praias e da erosão da orla costeira com presença de dunas (Stockdon *et al.*, 2002; Sallenger *et al.* 2003; Overton *et al.*, 2006; Burroughs e Tebbens, 2008; Castro e Alheiros, 1994; Duarte,

2002; Prefeitura do Recife, 2003; Prefeitura do Recife, 2003; Carneiro, 2003; Gregório, 2009; Manso *et al.*, 2006); alteração de paisagens (Berlanga-Robles & Ruiz-Luna, 2002).

Modelos Digitais de Elevação (DEM) têm sido amplamente utilizados para a quantificação de praia com presença de dunas e identificar as alterações no volume (por exemplo, Mitasova *et al.*, 2004; Overton *et al.*, 2006), incluindo a avaliação de impactos causados por tempestade e furacão (Sallenger *et al.*, 2006). A alta densidade dos pontos de dados e mapeamento costeiros usando o LIDAR anualmente fornecem séries temporais de dados de elevação que podem ser usados para a extração de novas informações sobre o espaço de padrões de dinâmica costeira, utilizando técnicas de varredura (Mitasova *et al.* 2009). No entanto, a evolução rápida da tecnologia LIDAR durante a última década produziu conjuntos de dados com inconsistências diferentes e uma grande quantidade de pontos coletados. Desse modo, para a análise geoespacial, quando aplicada a séries temporais LIDAR, é necessário resolver as questões de integração de dados e gerenciar a imensa massa de dados produzidos (Mitasova, 2010).

De acordo com Carneiro (2003), o monitoramento é um excelente instrumento para os planejadores, porque, por meio de mapas evolutivos, disponibiliza dados pertinentes ao estudo de meio ambiente, fornecendo informações sobre as mudanças ou alterações ambientais e a memória evolutiva, ou seja, as alterações da paisagem.

Os resultados das informações geradas pelo monitoramento são identificação de vetores de deslocamento que contribuem para estudos de eventos em escala local ou regional, fornecendo dados espaciais aos gestores urbanos para que direcionem ações de planejamento a fim de melhorar a qualidade de vida urbana.

Conforme Loch (1982), o desenvolvimento do monitoramento de eventos requer um sistema de coleta de informações que possibilite identificar a evolução dos elementos de interesse, e avaliar a área pesquisada de maneira repetitiva, ou seja, em diferentes datas. Nesse contexto, as técnicas de mapeamento fotogramétrico, as fotografias aéreas e os levantamentos orbitais podem ser aplicados. Porém, esses documentos cartográficos como imagens de satélite, mosaico de radar, fotografias aéreas, entre outros, permitem a visualização em duas dimensões, enquanto o mapeamento a LIDAR permite de imediato a visualização em 3D com precisão centimétrica.

Segundo Loch (1982), as vantagens do monitoramento espacial de eventos empregando diferentes sensores podem identificar as características e a origem dos agentes modificadores do espaço, reconhecer e mapear fenômenos, permitindo ainda estimar a extensão e a intensidade das alterações antrópicas.

Outras vantagens da aplicação dos documentos cartográficos no monitoramento de eventos são, por exemplo, a rapidez na resposta, pois permite que sejam obtidos resultados mais consistentes que no levantamento tradicional; são mais abrangentes, porque os mapas ou imagens, entre outras fontes, mostram toda a área de interesse em uma escala compatível, tornando compreensíveis áreas a que o acesso terrestre é impraticável.

A escala adequada e as diferentes respostas espectrais de cada imagem são estabelecidas de acordo com sensor mais apropriado para o estudo. Os sensores que podem ser utilizados para o monitoramento da ocupação urbana são imagens de satélites, mosaico de radar e as fotografias aéreas, que variam de grande a pequena escala.

Um fator importante no estudo de monitoramento de eventos é a resolução temporal, determinante no estudo de monitoramento de mudanças dos aspectos da natureza através do tempo. Cita-se, como exemplo, um método de análise para identificar e discriminar diferentes tipos de eventos e aspectos sazonais (Carneiro, 2003).

As utilizações de novas tecnologias permitem estreitar a defasagem entre as necessidades geradas, a ocupação antrópica e a capacidade do setor público de satisfazê-las. A facilidade na obtenção de dados LIDAR possibilita redução no tempo transcorrido entre a aquisição e o processamento de dados, podendo ser usado para atualizar aspectos no meio ambiente eficientemente, acompanhando sua dinâmica.

A dimensão espacial é um dos mais importantes aspectos a serem ponderados em estudo de ambiente costeiro. É por meio deste que se estabelece com precisão medidas que venham subsidiar a ação governamental para a manutenção e melhoria das condições de vida de determinada população.

Nesse contexto, a divulgação de novos estudos, a adoção inovadora de tecnologias mais eficientes como o LIDAR, a sistematização dos fatores condicionantes da problemática das zonas costeiras e a troca de experiências adquirem especial relevância.

CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia fundamenta-se na Geociências, aliado às Tecnologias da Geoinformação, visando ao monitoramento temporal do deslocamento das dunas. A Figura 4.1 apresenta as principais etapas da metodologia da pesquisa.

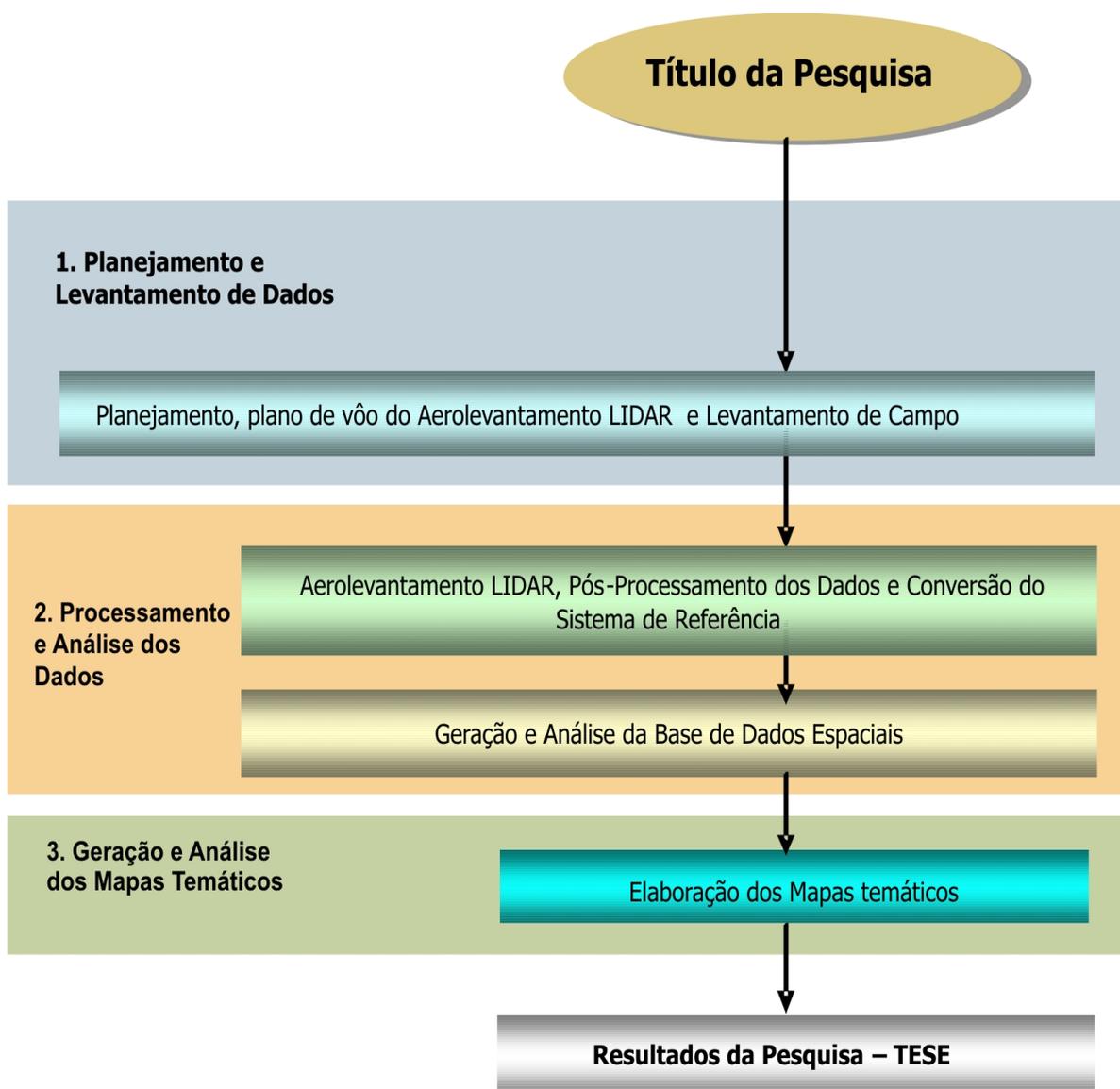


Figura 4.1 – Esquema da metodologia da pesquisa

4.1 PLANEJAMENTO E LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1.1 Coleta de dados e planejamento de campo

O estudo da área a ser pesquisada envolveu pesquisa e análise bibliográfica em diversos artigos e documentos científicos; vários trabalhos de campo na área da pesquisa; visitas e entrevista com pesquisadores de diversos órgãos públicos: no Brasil, o IBGE, 3.^a Divisão de Levantamento Comando do Exército em Olinda, Idema, entre outros; no exterior, Universidade Nova de Lisboa (Portugal), Universidade de New Brunswick (Canadá), Universidade Politécnica de Valencia (Espanha), Universidade Técnica de Viena (Áustria), entre outras.

A análise de documentos cartográficos (cartas topográficas, fotografias aérea, imagens de satélites, entre outros) atuais e pretéritos, subsidiou o planejamento do voo no que se refere ao georreferenciamento das poligonais da varredura laser conforme ilustra a Figura 4.2.

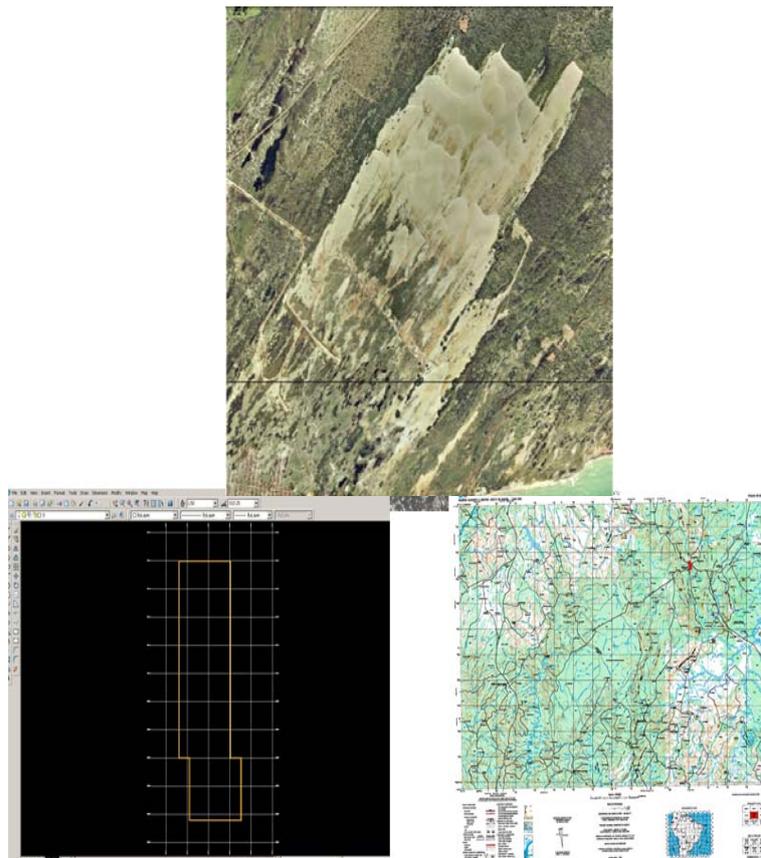


Figura 4.2 – Exemplos de documentos cartográficos analisados para subsidiar o mapeamento, assim como o georreferenciamento para criação de poligonais

4.1.2 Levantamento de campo

O levantamento LIDAR aerotransportável e o pós-processamento dos dados necessita 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, ilustrada na Figura 4.3. Nesse mapeamento a laser, um receptor GPS localizado no Sistema de Medição Inercial (SMI) registra a posição da aeronave a intervalos fixos. Outro receptor baseado no solo (base GPS) fornece 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.

No entanto, além da necessidade de bases terrestres corretamente espaçadas, existem outros fatores que contribuem para a deterioração da qualidade do sinal GPS, como por anomalias eletromagnéticas (tempestades elétricas) e condições atmosféricas adversas (nuvens densas, chuva entre outros). Outro fator encontrado em diversos estudos se refere à perda do sinal GPS no aparelho aerotransportado, ocasionada pela execução de manobras bruscas da aeronave.

A segunda etapa do planejamento é analisar e pesquisar os marcos geodésicos cadastrados pelo IBGE na área ou no entorno da região a ser mapeada, utilizando para amarração e transporte de coordenadas do levantamento de campo. Neste estudo selecionou-se a Estação 92356 do IBGE, localizada na laje da caixa-d'água do Edifício Ducal Center Palace, na Av. Rio Branco, esquina com a Rua João Pessoa, no centro da cidade de Natal, cujas coordenadas são N= 9.359.993, 489 m e E=255.596,330, MC -33 (Relatório desta Estação no Anexo E).

No transporte de coordenada, aplicou-se o método de levantamento GPS estático para as estações base GPS. Para tanto, observou-se a especificação de 31 de março de 1993 estabelecida pelo IBGE (1993), cuja recomendação é a distância entre os aparelhos (ou linha base) não ser superior a 50 km e respectivos tempos de rastreamento.

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, conforme monografia ilustrada na Figura 4.3. 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.

 Monografia da Base Rio do Fogo					
TESE Monitoramento das Dunas RIO DO FOGO RN					
Identificação do marco		Localidade	Município	Fuso	M. Central
Dunas_Rio_do_Fogo		Campo de Dunas	Rio Do Fogo RN	25	33°
Equipamento utilizado		Levantamentos	Processamentos	Responsável	
Trimble 5700L1/L2		10/12/2001 e 08/11/2004	12/12/2001 e 09/11/2004	Marcia Carneiro	
Coordenadas do marco					
Geográfica Datum SAD69			UTM Datum SAD69		
Lat	05°19'12,37193"S	Lat	N	9411436,747m	
Long	35°23'47,26609"W	Long	E	234398,258m	
Coordenadas determinadas por rastreamento de satélites a partir do marco SAT92356. Para obtenção da cota ortométrica, foi usado o MAPGEO2010 IBGE.					
Entrada do Campo de Dunas (data: 14/01/2009)			Localização da Base GPS		
					
Localização					
Localizado no campo de Dunas do Rio do Fogo - Dentro do Parque Eólico do Rio do Fogo.					
Itinerário					
Saindo da cidade de Natal capital do Estado do Rio Grande do Norte, segue pela BR 101 até o Parque Eólico do Rio do Fogo.					
Obs:Coordenadas georreferenciadas do SAT 92356 em SAD 69.					

Figura 4.3 – Monografia da base Rio do Fogo.

4.1.3 Planejamento de voo

Na etapa de planejamento do voo, subdividiu-se a área pesquisada em várias seções, utilizando-se, para tanto, software específico, ilustrado na Figura 4.4, de modo a dar um recobrimento da largura da faixa mínima de 1.500 metros aproximadamente com altura de voo aproximada do solo de 2.000 metros, buscando uma precisão submétrica, usando-se um programa específico em que se estabeleceu a velocidade da aeronave em 23 e o ângulo de abertura de $40^\circ (\pm 20^\circ)$.

Nos voos, utilizou-se uma aeronave Cessna C180 (Figura 4.5), equipada com Laser Aerotransportado Tecnologia LIDAR, denominado *Airborn Laser Terrain Mapper (ALTM)*. O equipamento ALTM emitiu pontos aleatórios sobre o terreno, encontrando resultados melhor que 1,6m de equidistância média entre os pontos, para detalhar as principais feições de solo, vegetação, edificações entre outros. A frequência do aerolevanteamento a laser foi de 19Hz. Para tanto, realizaram-se aerolevanteamentos LIDAR em 10 de dezembro de 2001 e 8 de novembro de 2004 no período de verão.

The screenshot displays the ALTM-NAV Planner 2.0.61 interface. The main window shows a flight plan configuration for a LIDAR survey. The 'Plan Survey Grid' window is open, showing the following settings:

Flight Profile		LIDAR Settings		Camera Settings	
Altitude (ft AGL)	2000	System PRF (kHz)	71	Photo Overlap (%)	30
Pass Heading (deg)	61	Scan Freq (Hz)	67	Line Spacing	1
Overlap (%)	30	Scan Angle +/-	11	Line Overlap (%)	59.28
Speed (kts)	130	Scan Offset	0	Pixel Size X (m)	0.1
Turn Time (min)	5	Desired Res (m)	0.473	Pixel Size Y (m)	0.1
Passes	43	Cross Track Res	0.447	Trigger Dist (nmi)	0.15
Swath (m)	236.55	Down Track Res	0.499	Trigger Time (sec)	4.265
Pass Spacing (m)	165.58	Scan Cutoff (deg)	0.02		

The 'Survey Totals' section shows:

Survey Totals					
Total Passes	43	Total Length (km)	366.846	Swath Area (km ²)	60.742
Total Frames	1286	Total Flight Time	05:13:08	AOI Area (km ²)	38.873
				Total Laser Time	01:31:25

The 'Costs' section shows:

Costs				
<input type="radio"/> Use Swath Area	Cost per Acre	0	Area Cost	\$0
<input checked="" type="radio"/> Use AOI Area	Cost per Hour	0	Time Cost	\$0

Figura 4.4 – Exemplo do software utilizado para elaboração do plano de voo



Figura 4.5 – Fotografia da aeronave utilizada nos aerolevantamentos a laser, avião Cessna C180

4.2 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

O pós-processamento realizou-se mediante um conjunto de programas e equipamentos descritos a seguir. Os dados coletados, chamados Dados Brutos (*Raw Data*), são 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.

Os equipamentos utilizados no pós-processamento consistem de computadores do tipo PC com boa capacidade de processamento. Destaque-se que são requisitos imprescindíveis e têm influência no processo a velocidade do processador (recomenda-se o uso de duplo processador), a quantidade de memória e a interface de disco rígido do tipo SCSI. Como os dados brutos foram armazenados em fitas 8 mm do tipo *Exabyte*, é necessária unidade de leitura e gravação. A Figura 4.6 ilustra as etapas do pós-processamento, em que os programas utilizados são específicos e podem ser categorizados da seguinte forma: extração dos Dados Brutos gravados durante o levantamento; separação dos Dados Brutos em dados GPS, Dados POS (inerciais) e Dados LASER; refinamento dos Dados separados; Integração dos Dados separados com os Dados GPS das bases terrestres; Processamento Final com uso de polígono de corte; Processamento Específico para Remoção de Camada Vegetal entre outras feições.

A Figura 4.6 ilustra o pós-processamento em laboratório, tanto do voo como da leitura GPS de base.

Segundo Rivas & Brito (2003), o volume de dados é dependente da duração do voo e do tempo em que o sensor LASER está ligado e coletando informações. Em geral, são necessários 300 MBytes para cada hora de Dados Brutos coletados, relativamente a um aparelho com frequência de operação de 25 kHz, e 2,5 GBytes por hora de voo após o refinamento e preparação dos dados, relativamente a processamentos específicos como a remoção de vegetação.

Os dados processados são apresentados em um conjunto de coordenadas tridimensionais no sistema WGS-84 (leste, norte e elevação), no formato ASCII, fornecendo uma vantagem no processamento de futuras conversões, tanto de coordenadas como de formato de arquivo, de acordo com a necessidade do usuário final.

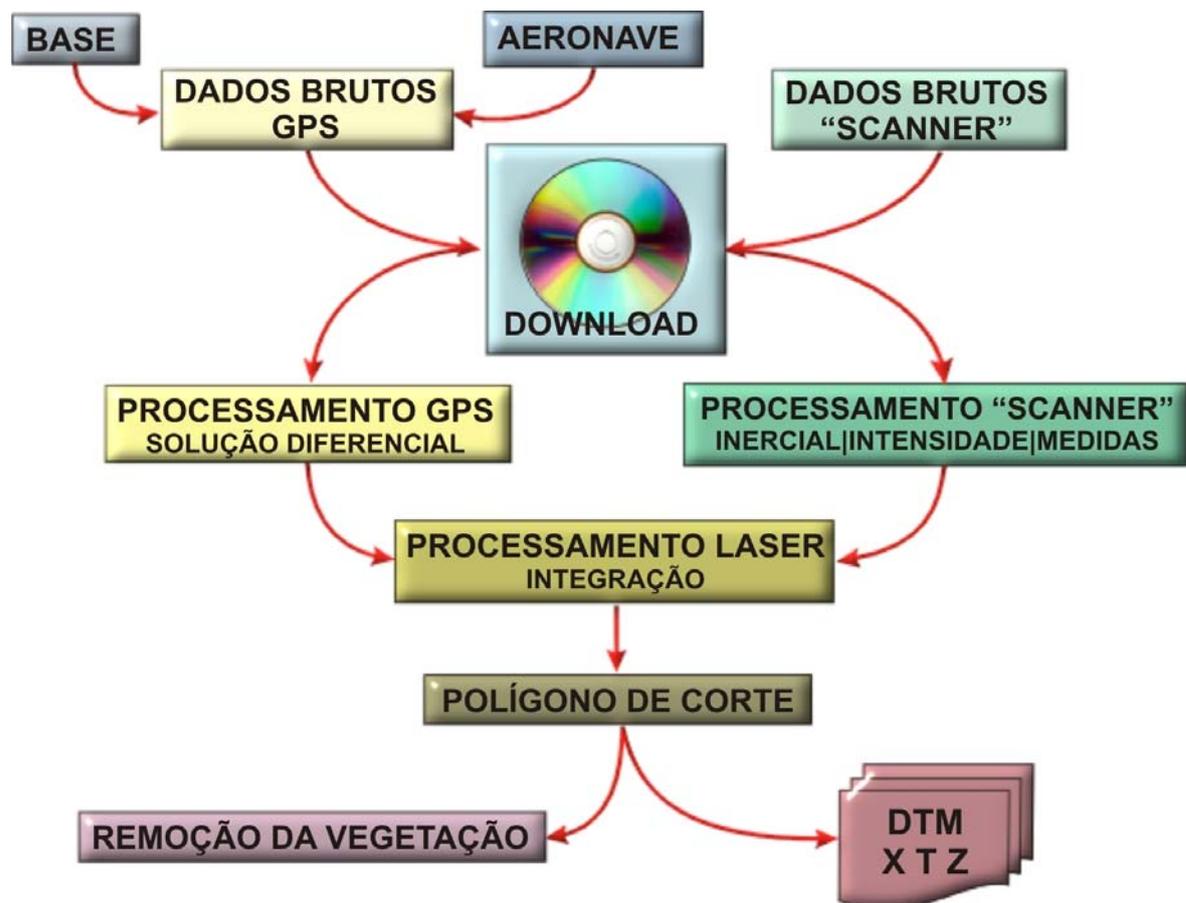


Figura 4.6 – Fluxograma de processamento
Fonte: Adaptado de Brandalize (2004)

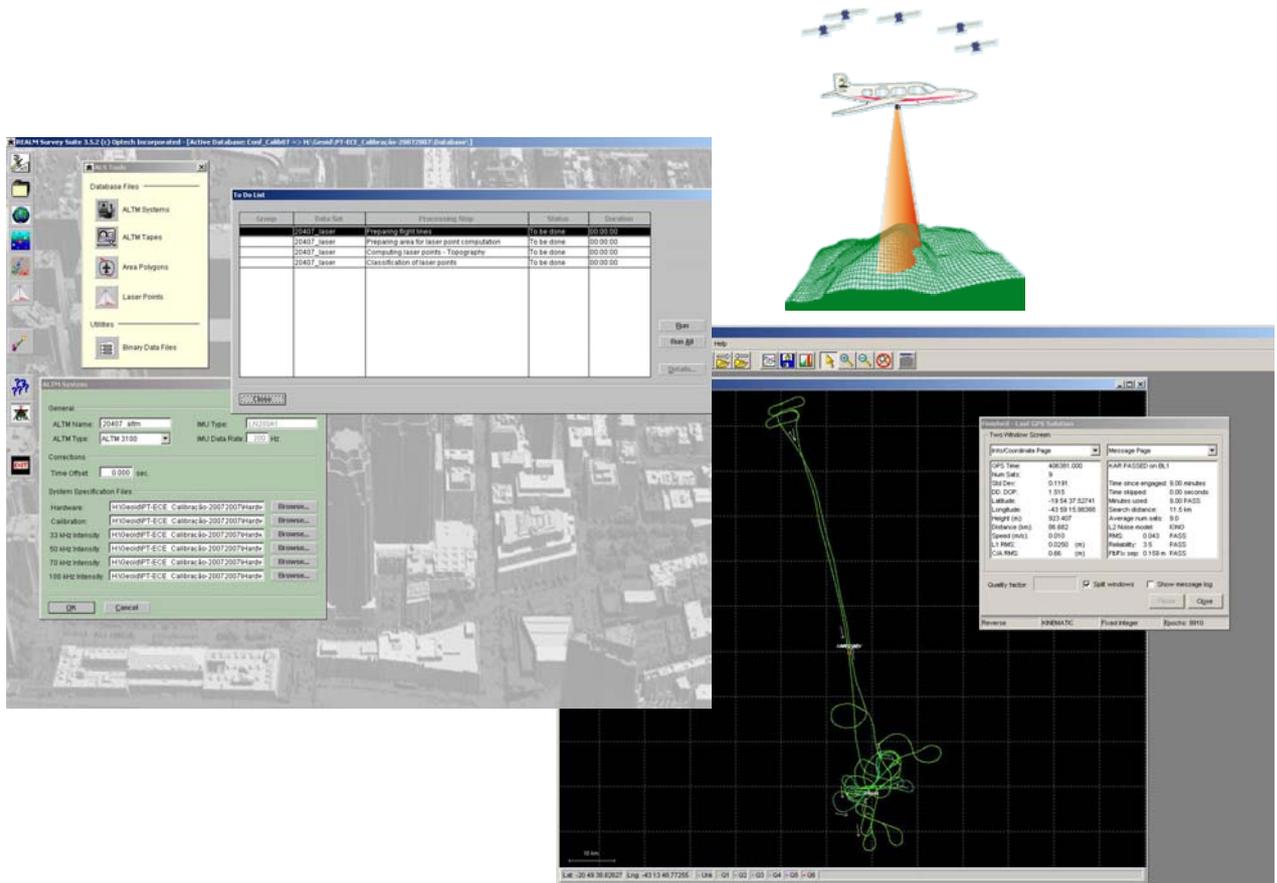


Figura 4.7 – Pós-processamento em laboratório do voo e da leitura GPS de base

Assim que se processam os dados, segundo Rivas & Brito (2003), eles são agrupados de acordo com o pulso refletido correspondente. No momento da coleta, o sensor armazena todo o dado relacionado com cada eco do pulso laser refletido em arquivos diferentes. No processamento, os resultados obtidos são dispostos em arquivos separados, o que dificulta o emprego das informações obtidas. Rivas & Brito (2003, p. 3) relatam:

O problema maior é que ainda não é possível diferenciar quais informações correspondem ao relevo ou a qualquer outro fenômeno geográfico ou objeto presente na superfície estudada. Este fato ressalta a necessidade de empregar uma estratégia que permita classificar as informações obtidas, tendo como critério de classificação o fenômeno geográfico a analisar.

Essa estratégia é conhecida como filtragem e será descrita em seguida.

O objeto da filtragem é extrair do conjunto de dados brutos coletados pelo sistema a informação sobre a topografia da região de interesse, para facilitar a futura construção do Modelo Numérico de Elevação.

O sistema de mapeamento a laser aerotransportado não reconhece qual ponto coletado corresponde ao relevo, à vegetação ou a qualquer outro atributo presente na superfície de

estudo. O conjunto de dados registrados dispõe os mesmos atributos, referidos às coordenadas X, Y e Z, de acordo com o sistema de projeção adotado. Porém, durante a coleta de dados, o sistema consegue registrar um dado que identifica o tipo de eco do pulso que foi emitido ao interagir com qualquer objeto presente na área de estudo.

A capacidade de registrar diferentes tipos de eco de cada pulso laser permite aplicar algumas técnicas de filtragem para identificar que pontos registrados como primeiro, segundo ou terceiro eco de pulso refletido representam mais adequadamente a topografia da superfície estudada.

A característica de extrair a informação do solo, por intermédio dos dados adquiridos, abre um amplo campo de utilidades do LIDAR, as quais variam desde o estudo da biomassa de uma região até levantamentos batimétricos.

Com os dados referentes à calibração e à montagem do sistema, ao posicionamento inercial e à medição propriamente dita, é possível o cálculo de um conjunto de pontos perfilados referenciados ao sistema WGS-84.

O conjunto de pontos pode ser transformado para o sistema de coordenadas local utilizando as fórmulas de transformação de *Datum* usualmente empregadas (por exemplo, fórmulas de *Molodensky*).

Geralmente, o conjunto de pontos (2.000 pontos /segundo) apresenta-se como uma "nuvem" cuja distribuição depende do padrão de varredura utilizado. Esses pontos foram classificados de acordo com a elevação, com identificação de pontos sobre o terreno e pontos sobre vegetação e solo. Nessa etapa, utilizam-se algoritmos de filtragem. Esses algoritmos podem ser aplicados tanto à "nuvem" de pontos quanto a um conjunto de pontos espaçados regularmente. Como a quantidade de pontos resultante do processamento foi muito grande, reduziu-se para atender à capacidade de processamento das aplicações e realizada a visualização dos dados e a edição.

A precisão planialtimétrica alcançada foi num intervalo de 15 centímetros.

4.2.1 Transformação de coordenadas

Segundo Zanetti (2006), a transformação de coordenadas em um Sistema Geodésico para outro pode ser efetivada por meio da transformação de similaridade entre outras. A Resolução PR n.º 22, de 21 de julho de 1983 (IBGE, 1983) apresenta as especificações e normas gerais e estabelece tolerâncias e critérios para a execução de Levantamentos Geodésicos no território brasileiro.

De acordo com essa resolução, a transformação de coordenadas em diferentes sistemas geodésicos deve ser feita segundo as equações simplificadas de Molodenskii. Nesta pesquisa realizou-se a transformação de coordenadas referidas ao *datum* WGS 84, obtidas por meio de observações GPS processados para as coordenadas referidas ao *datum* SAD 69 e projetadas para o sistema Universal Transversa de Mercato (UTM) no fuso conforme localização da área de estudo.

A Resolução PR n.º 22, assim como a Resolução n.º 23, de 21 de fevereiro de 1989, apresentam os parâmetros de transformação entre alguns sistemas geodésicos. Essas resoluções apresentam também uma sequência de cálculo para transformação de coordenadas em diferentes sistemas geodésicos de referência a partir de coordenadas cartesianas tridimensionais (Zanetti, 2006). Um grande conjunto de parâmetros de transformação entre sistemas nacionais e o WGS84 está disponível National Geospatial-Intelligence Agency (2009).

4.3 GERAÇÃO E ANÁLISE DOS MAPAS TEMÁTICOS

Na elaboração da base de dados espaciais por meio da tecnologia de mapeamento a laser aerotransportado (LIDAR), realizaram-se dois voos pela Empresa Geoid Ltda, patrocinadora desta pesquisa; o primeiro em 10 de dezembro de 2001 e o segundo em 8 de novembro de 2004, conforme mencionado. Diversos fatores colaboraram na escolha dos períodos de realização da pesquisa, entre eles, pode-se destacar que no verão os índices pluviométricos registrados são menores e conseqüentemente o deslocamento das dunas são maiores (Castro, 2004). Outro fator se deve a melhor qualidade nos dados do aerolevanteamento a laser; nessa estação, o índice pluviométrico é menor, o que facilita a melhor visualização das imagens de nuvens de pontos a laser principalmente pela especificidade desse levantamento em permitir mapear as gotas das chuvas.

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 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 feita 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.

Posteriormente, analisou-se o conjunto de pontos filtrados e classificados no Terramodel. Em seguida, as nuvens de pontos sobrepuseram-se à imagem de intensidade Laser Scanner para identificar possíveis pontos filtrados e classificados erroneamente, possibilitando sua correção. Com os pontos de solo, geraram-se as curvas de nível de 5 em 5 metros para possibilitar, então, a elaboração de mapas temáticos sobre a tendência do deslocamento das dunas e a avaliação da evolução espaço-temporal do campo de dunas. Utilizando software ArcView, calculou-se o volume de sedimentos deslocado de 2001 para 2006.

No mapa de uso do solo, utilizou-se a base de dados gerados pelo sistema LIDAR; em seguida, importaram-se os arquivos para software ArcView. Para tanto, selecionaram-se inicialmente as classes de uso e ocupação do solo por meio da interpretação das fotografias aéreas, e nas imagens geradas pelo LIDAR. Posteriormente, selecionaram-se oito classes de uso do solo: vegetação arborea densa, vegetação arborea arbustiva, vegetação antropizada, dunas ativas, dunas fixas, área urbanizada, vila e depósitos marinhos recentes. Essas classes se confirmaram no trabalho de campo. Em seguida, as classes identificadas e posicionadas com manchas de diferentes cores foram digitalizadas e transferidas para o software ArcView a fim de se elaborar o mapa.

Elaborou-se o Mapa geomorfológico segundo recomendações da União Geográfica Internacional (UGI) e adaptada a legenda utilizada por Ferreira (2010). Na elaboração desse mapa, utilizou-se, ainda, a base de dados gerados pelo sistema LIDAR e importaram-se os arquivos para software ArcView. As feições morfológicas desse ecossistema dunar se identificaram mediante a interpretação das imagens de pontos geradas pelo LIDAR. Depois da interpretação, posicionaram-se as unidades morfológicas: 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.

A segunda unidade 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.

Para avaliar as alterações ambientais da área nos últimos trinta e seis anos, realizou-se um estudo espaço-temporal do campo de dunas por meio da análise e comparação de documentos cartográficos atuais e pretéritos, ou seja, fotografia aérea (voo aerofotogramétrico em fevereiro de 1969), realizado pela Empresa Aerofoto Cruzeiro – e ortofotocarta (voo aerofotogramétrico em maio de 2005) elaborada pela Empresa Topocart. A periodização adotada tentou enfatizar uma visualização mais macro dos momentos de transformação nas feições eólicas da área de estudo; sendo esses momentos influenciados pelas mudanças na ordem social, política e econômica do país que refletiram no espaço do litoral.

Os programas e equipamentos utilizados na pesquisa foram cedidos pelo IBGE, Geoid e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Destacam-se 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 comercial 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) é um programa que permite importar dados LIDAR e geração de mapas.

Em relação aos equipamentos, utilizaram-se: 2 receptores de *Global Positioning System* (GPS), com duas frequências e 20 canais, e as respectivas antenas; *Airborne Laser Terrain Mapper* 1210 (ALTM); *Arborne Laser Scanning* (ALS); Aeronave Cessna C180; microcomputador; impressora; Plotter; Notebook entre outros.

CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO CAMPO DE DUNAS COM COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES RECOBRIMENTOS AEROFOTOGRAFÉTRICOS

Para melhor entendimento macroambiental do comportamento da área nos últimos trinta e seis anos, analisaram-se documentos cartográficos atuais e pretéritos a fim de subsidiar o monitoramento cartográfico, ou seja, documentos de 1969 e 2005. A periodização adotada tentou enfatizar os momentos de transformação nas feições eólicas da área de estudo influenciadas nas mudanças na ordem social, política e econômica do país que refletiram no espaço do litoral. A análise temporal, apresentada na Figura 5.1, conjuga a interpretação das fotografias aéreas de 1969 (voo aerofotogramétrico em fevereiro de 1969) e ortofotocarta de 2005 (voo aerofotogramétrico em maio de 2005).

Diversos estudos sobre a ocupação da costa potiguar revelam a migração dos habitantes para a costa intensificada no início de 1900, entre outros motivos, pelos longos períodos de estiagem. Com a vocação pecuarista e agrícola, esses habitantes tentam manter sua sobrevivência com essas atividades, ocupando nesse momento as feições praias. Como não encontraram solo fértil, as atividades agrícolas e pecuárias entraram em decadência. Consequentemente, essas atividades foram abandonadas no início da década de 1960.

Supõe-se que o abandono dessas atividades seja a hipótese que justifica o processo natural de recomposição da ocupação e regeneração das espécies de vegetação pioneiras (nativas) do campo de dunas de Rio do Fogo. Na Figura 5.1, a fotografia aérea mostra que o campo de dunas estava desnudo de vegetação em 1969, e num período de trinta e seis anos houve regeneração e reconstrução natural da vegetação nativa. Corroboraram para tanto diversos fatores, entre eles, os fatores climáticos favoráveis, insolação, precipitação, entre outros motivos.

No estudo, identificou-se a dinâmica das feições eólicas e ocupação antrópica, e delinear-se as implicações no processo de ocupação costeira da área de estudo. Descrevem-se a seguir os resultados relevantes.

Na fotografia aérea de 1969, observa-se toda a paisagem da área de estudo ocupada pelo imenso campo de dunas de Rio do Fogo (dunas móveis desnudas de vegetação), enquanto na fotografia aérea de 2005, observa-se a redução da área do campo de dunas e ocupada pela vegetação arbustiva arbórea densa e ora espaçada ilustrada pela fotografia (Figura 5.1).

Constata-se na comparação das fotografias aéreas de diferentes datas (Figura 5.1) uma diminuição da atividade eólica, com fixação das dunas; o conjunto de dunas barcanas e parabólicas vem sendo fixado pela vegetação. Existe evidência de que essa fixação vem ocorrendo na frente de migração das dunas, pois na fotografia mais recente a frente de migração das dunas apresenta menos contornos, e estão mais arredondadas.

Nessas áreas sem cobertura vegetal, observa-se continuamente um processo de erosão eólica, provocando a mudança da paisagem, com a migração das dunas móveis soterrando as paleodunas e provocando a exposição da Formação Barreiras.



Figura 5.1 – Fotografias aéreas de 1969 e 2005 ilustrando as alterações na área de estudo, especialmente do campo de dunas de Rio do Fogo, em um período de trinta e seis anos

Fonte: Topocart (voo aerofotogramétrico em maio 2005) e Aerofoto Cruzeiro do Sul (voo aerofotogramétrico, fev. 1969)

Outro aspecto observado é o aumento da ocupação antrópica nas áreas urbanizadas – área urbanizada da cidade de Rio do Fogo e Zumbi ilustradas na Figura 5.2.



Figura 5.2 – Fotografia da Vila do Zumbi

A Figura 5.3 ilustra bem as bordas das dunas sendo ocupadas por uma vegetação nativa exuberante, justificando também a hipótese do processo natural de fixação tanto das bordas como da frente do campo de dunas de Rio do Fogo.



Figura 5.3 – Fotografia da vegetação da área de estudo, janeiro 2006

5.2 DESLOCAMENTO DO CAMPO DE DUNAS DE RIO DO FOGO

Elaboraram-se os mapas de monitoramento do deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo para quantificar o deslocamento das dunas ativas. O primeiro mapa, na escala 1:20.000, cobre toda a área da pesquisa, em que se observam superpostas a imagem, as nuvens de pontos laser, curvas de nível de 5 em 5 metros, e dois *zoom* gerando dois mapas de detalhe na escala 1:10.000, com as curvas de níveis de diferentes cores que representam as áreas de elevações de 20 metros, 30 metros e 40 metros dos voos a laser nas duas datas, dezembro/2001 e novembro/2004, conforme ilustra a Figura 5.4 e mapa em Anexo A.

Nesse mapa encontram-se posicionados diversos vetores que indicam as distâncias da migração horizontal das dunas ativas, que chegam a se deslocar no período de dois anos e onze meses até 54 metros. Além disso, o mapa apresenta uma cobertura de toda a área da pesquisa, por isso, sua utilização para uma análise mais ampla e geral desse ecossistema eólico dunar. Esse mapa serviu, ainda, como base de dados espaciais, interpretação e posicionamento das feições denominadas de classes e morfologias ambientais dos respectivos Mapas de uso do solo e geomorfológico.

O segundo mapa do monitoramento do deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo, gerado num contexto mais detalhado, cobriu o campo de dunas móveis; também elaborado para quantificar o deslocamento das dunas ativas e identificar as feições eólicas. Nesse mapa, na escala 1:10.000, observam-se superpostas a imagem a nuvens de pontos laser curvas de nível de 5 em 5 metros, e dois *zoom* gerando dois mapas de detalhe na escala 1:2.000, com as curvas de níveis nas cores azul, que representam o levantamento a laser de 2001 enquanto as curvas de nível em vermelho, representam o levantamento a laser em dezembro/2004. Nesse mapa de detalhe encontram-se posicionados os vetores que indicam as distâncias (em amarelo) da migração horizontal das dunas ativas que chegam a se deslocar no período de dois anos e onze meses até 67 metros, conforme ilustra a Figura 5.5 e mapa em Anexo B.

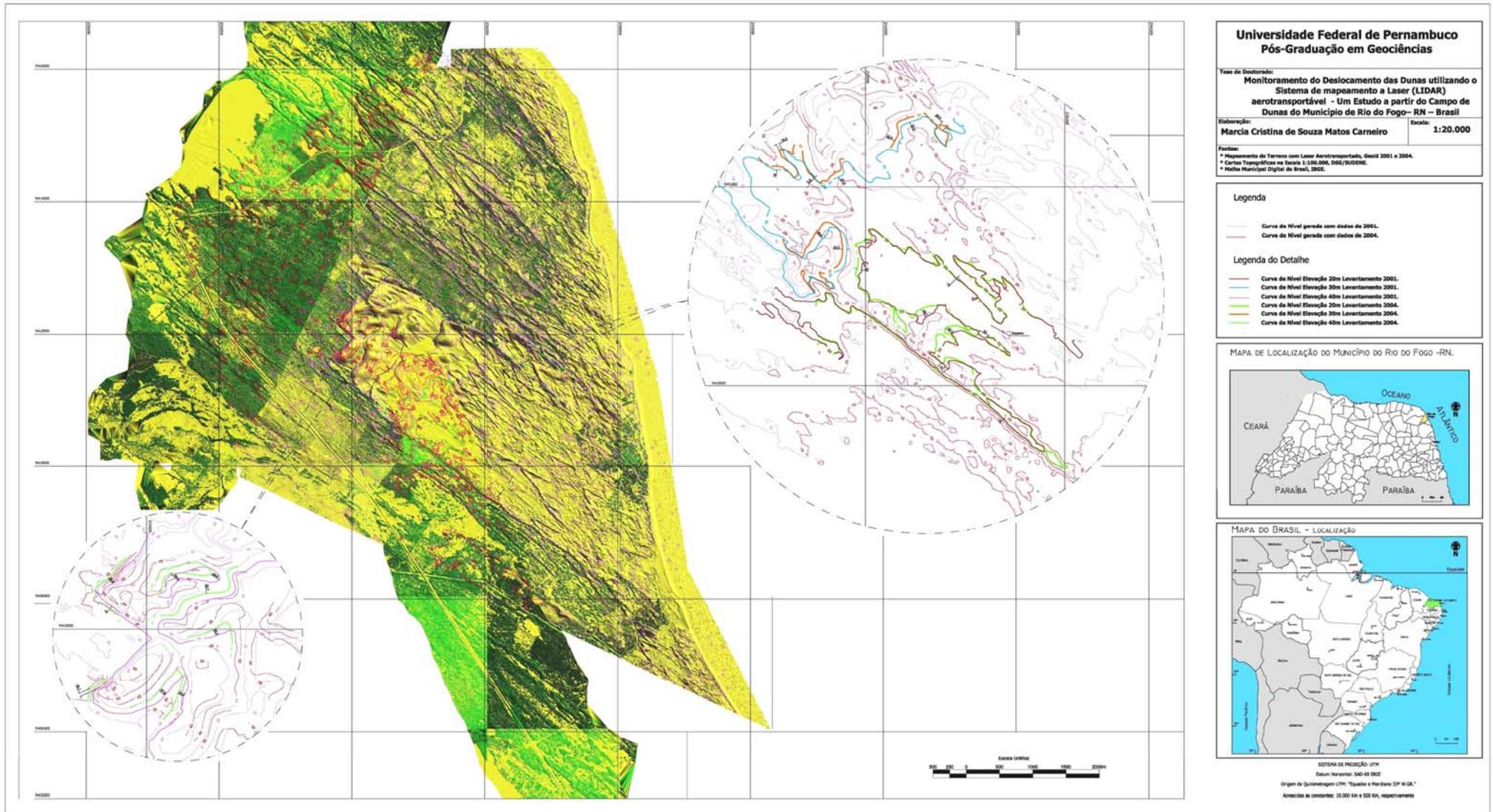
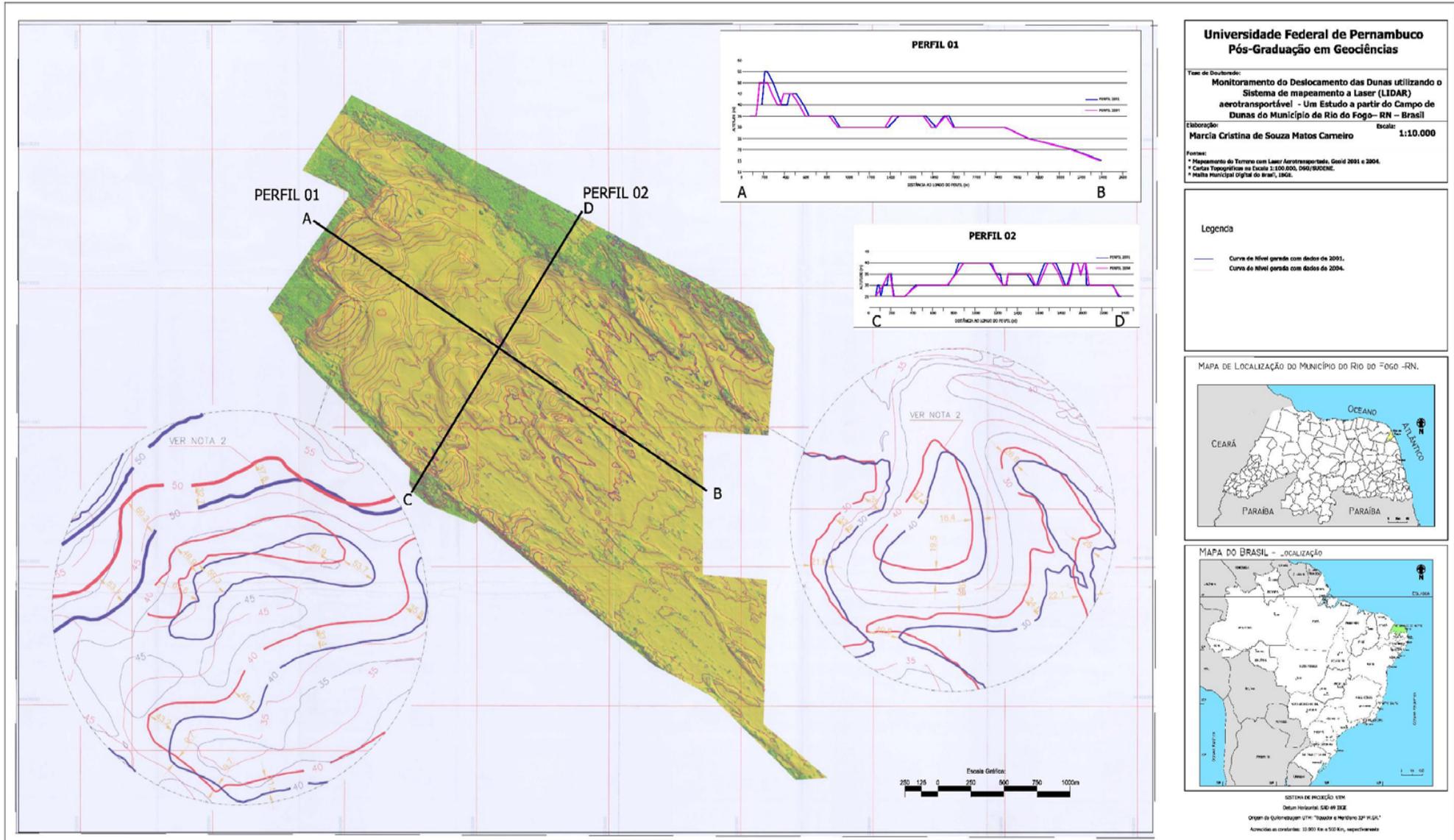


Figura 5.4 – Mapa de evolução do campo de dunas: migração horizontal das dunas na escala de 1:20.000 (Mapa no Anexo A)



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Geociências

Tema de Doutorado:
Monitoramento do Deslocamento das Dunas utilizando o Sistema de mapeamento a Laser (LIDAR) aerotransportável - Um Estudo a partir do Campo de Dunas do Município de Rio do Fogo - RN - Brasil

Elaboração: **Marcia Cristina de Souza Matos Carneiro** Escala: **1:10.000**

Fontes:
 * Mapeamento do Terreno com Laser Aerotransportável, Geod 2001 e 2004.
 * Carta Topográfica na Escala 1:500.000, DNIG/IBUCEM.
 * Mapa Municipal Digital do Brasil, 1962.

Legenda

- Curva de nível gerada com dados de 2001.
- Curva de nível gerada com dados de 2004.

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DO RIO DO FOGO -RN.

Map showing the location of Rio do Fogo Municipality in the state of Rio Grande do Norte, Brazil, relative to neighboring states Ceará and Paraíba, and the Atlantic Ocean.

MAPA DO BRASIL - LOCALIZAÇÃO

Map showing the location of Rio do Fogo Municipality within the state of Rio Grande do Norte, Brazil.

SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM
 Datum Horizontal: SAD 49 SBR
 Origem de Coordenadas: UTM "50Q" e Meridiano SP "18A"
 Atribuição as coordenadas: 500000 Km e 500 Km, respectivamente

Figura 5.5 – Mapa de evolução do campo de dunas: a migração horizontal das dunas na escala de 1:10.000 (Mapa no Anexo B)

Além disso, no mapa de detalhe na escala 1:2.000, elaborou-se um perfil, que mostra a migração horizontal das dunas parabólicas, ilustrado na Figura 5.6. As curvas de níveis nas cores azuis representam o levantamento de 2001, e as curvas de nível em vermelho, representam o levantamento a laser em 2004. O resultado da análise desse perfil comprova que essas dunas se deslocam no período de dois anos e onze meses entre 43,8 metros até 64,1 metros. Nesse perfil o campo de dunas apresentou uma taxa de deslocamento anual que variou num intervalo de 15,01m/ ano a 21,97 m/ano, e uma taxa de deslocamento horizontal mensal que variou num intervalo de 1,25m/ mês a 1,83m/mês.

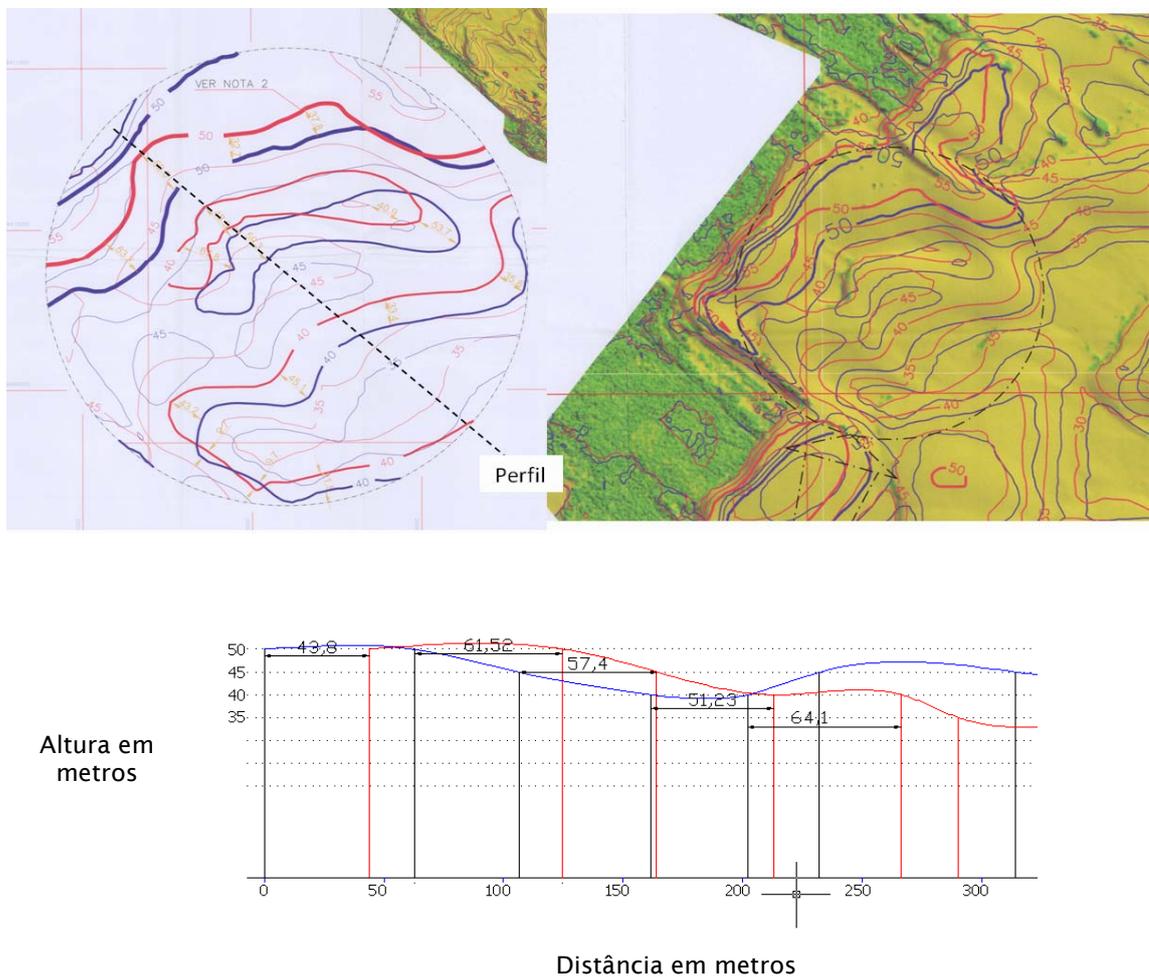


Figura 5.6 – Perfil da migração horizontal das dunas

No mapa da Figura 5.5 (Anexo B), registram-se também dois segmentos ao longo do campo de dunas perpendicularmente, um, no sentido NO-SE e o outro NE-SO. Esses segmentos ou cortes representam-se em perfis com duas dimensões: a seção horizontal

representa a distância ao longo do perfil, e o eixo vertical representa a altitude em metros. As linhas na cor azul representam as curvas de nível do levantamento LIDAR aerotransportado realizado em 2001, e as linhas em rosa representam curvas de nível do levantamento LIDAR aerotransportado obtidas em dezembro de 2004.

A análise da representação dos perfis permite concluir que no perfil 1, ilustrado na Figura 5.7, o campo de dunas apresentou um deslocamento na direção sudeste-noroeste, pois a linha de cor rosa que ilustra as curvas de nível de 2004 estão na frente das linhas azuis que ilustram as curvas níveis de 2001; resultado desencadeado pela direção predominante dos ventos alísios de sudeste que, segundo Bigarella (1971). No eixo vertical do perfil, apresenta uma altitude que se inicia em 15 metros, chegando à frente do campo de dunas com uma altitude de até 55 metros.

Nesse perfil permite-se observar, ainda, uma acumulação de sedimentos que leva a um aumento das cotas de relevo próximas à sua borda na sua porção noroeste do campo de dunas, em que se pode afirmar que a vegetação vem fixando parcialmente essas dunas, no entanto, sem conseguir fixar totalmente.

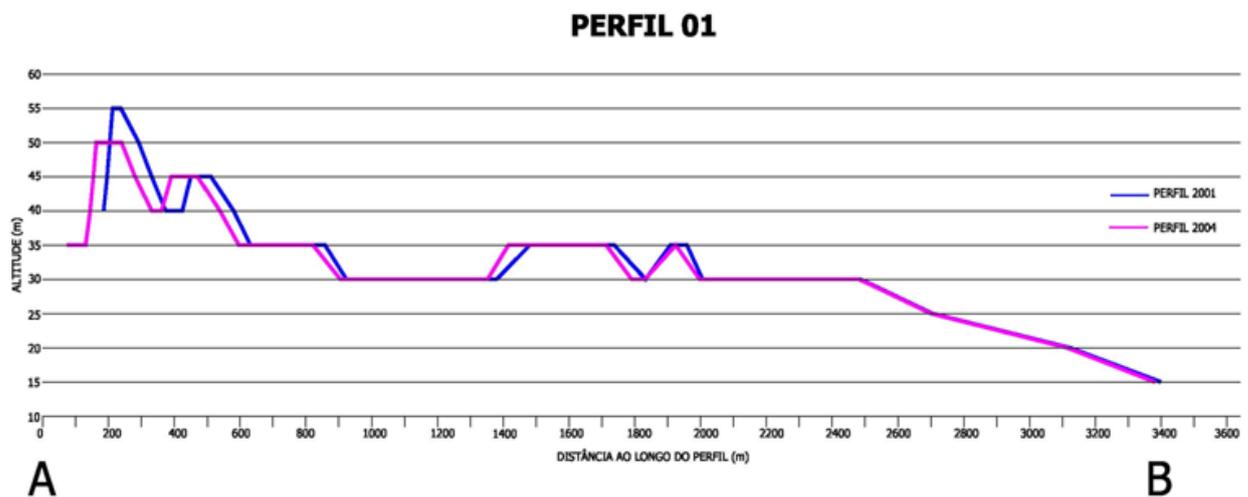


Figura 5.7 – Perfil 1 no sentido NO-SE do campo de dunas móveis de Rio do Fogo
 Nota: No eixo horizontal representa as distâncias em metros ao longo do campo e eixo vertical as altitudes em metro

Nesse contexto, visualiza-se que a frente de migração do campo de dunas apresenta feições retas. Nessa área existe maior eficiência da vegetação (vegetação bem mais densa), ilustrada na fotografia local na Figura 5.2 e em toda a mancha na cor verde nos mapas dos Anexos A e B, enquanto mais a nordeste do campo de dunas, houve uma mudança ambiental

que possibilitou o surgimento de uma nova frente de migração. Essa frente a nordeste já se relaciona com as dunas superimpostas, ou secundárias.

Notam-se pelo menos duas gerações de dunas. O perfil 2 (Figura 5.5, mapa no Anexo B e figura 5.8) mostra que as dunas de maior altitude se localizam na parte central e noroeste do campo de dunas, atingindo uma altitude de até 40 metros, ocasionado por ser uma área mais exposta aos ventos e por ter menos barreiras. O mapa apresenta na porção sudeste uma grande quantidade de dunas barcanas compostas (essas formas parecidas com uma mão). Essas são bem mais rebaixadas. Isso indica que a oferta de areia diminuiu ou que o vento perdeu velocidade. Aliado a isso, existe esse fenômeno natural que pode estar relacionado com o maior densamento da vegetação nas bordas e na frente do campo de dunas.

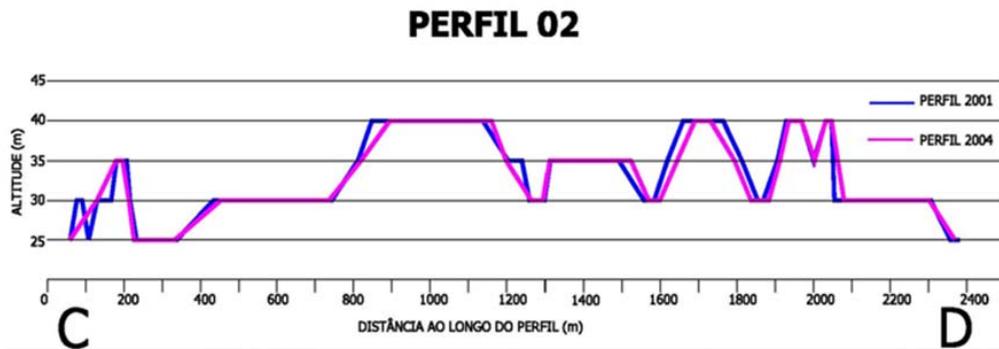


Figura 5.8 – Perfil 2 no sentido NE-SO do campo de dunas móveis de Rio do Fogo
Nota: No eixo horizontal representa as distâncias em metros ao longo do campo e eixo vertical as altitudes em metro

Diversos estudos morfométricos das dunas na zona costeira do estado do Ceará e do Rio Grande do Norte, destacando-se Castro (2004), comprovam que as dunas de modo geral nessa região têm seus deslocamentos controlados por pulsos climáticos, sendo o regime do vento e as precipitações pluviométricas os principais agentes responsáveis pelo controle ambiental e processo de migração das dunas. Castro afirma que, durante a estação chuvosa (fevereiro a maio), o transporte de sedimentos é parcialmente interrompido. Enquanto na estação seca, o transporte de sedimento eólico é retomado. Ele afirma: “[...] a velocidade de migração das dunas durante a estação chuvosa é $\frac{1}{4}$ do valor médio obtido durante a estação seca.” (Castro, 2004, p. 9).

Segundo Goldsmith (1978), 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 no estudo de Castro (2004) 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, para tanto selecionaram-se 6 pontos na duna conforme ilustra a Figura 5.10.

Realizou-se outra análise do mapa da Figura 5.5 (Anexo B) por meio do recorte de duas dunas de morfologia diferentes, ilustradas nas Figuras 5.9 e 5.10.

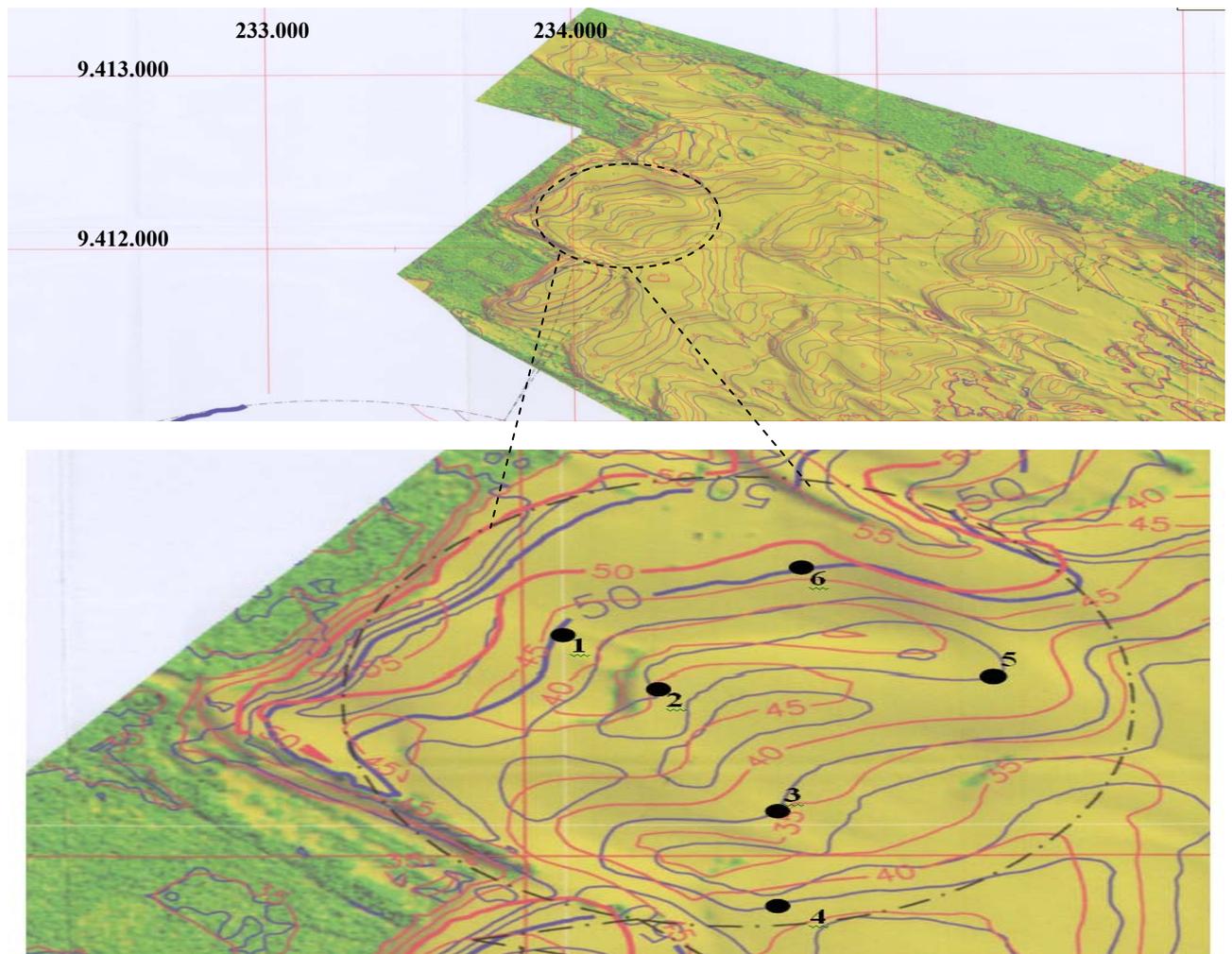


Figura 5.9 – Duna parabólica posicionada seis pontos distintos na escala 1:10.000 do recorte do mapa de deslocamento do campo de dunas (Anexo B)

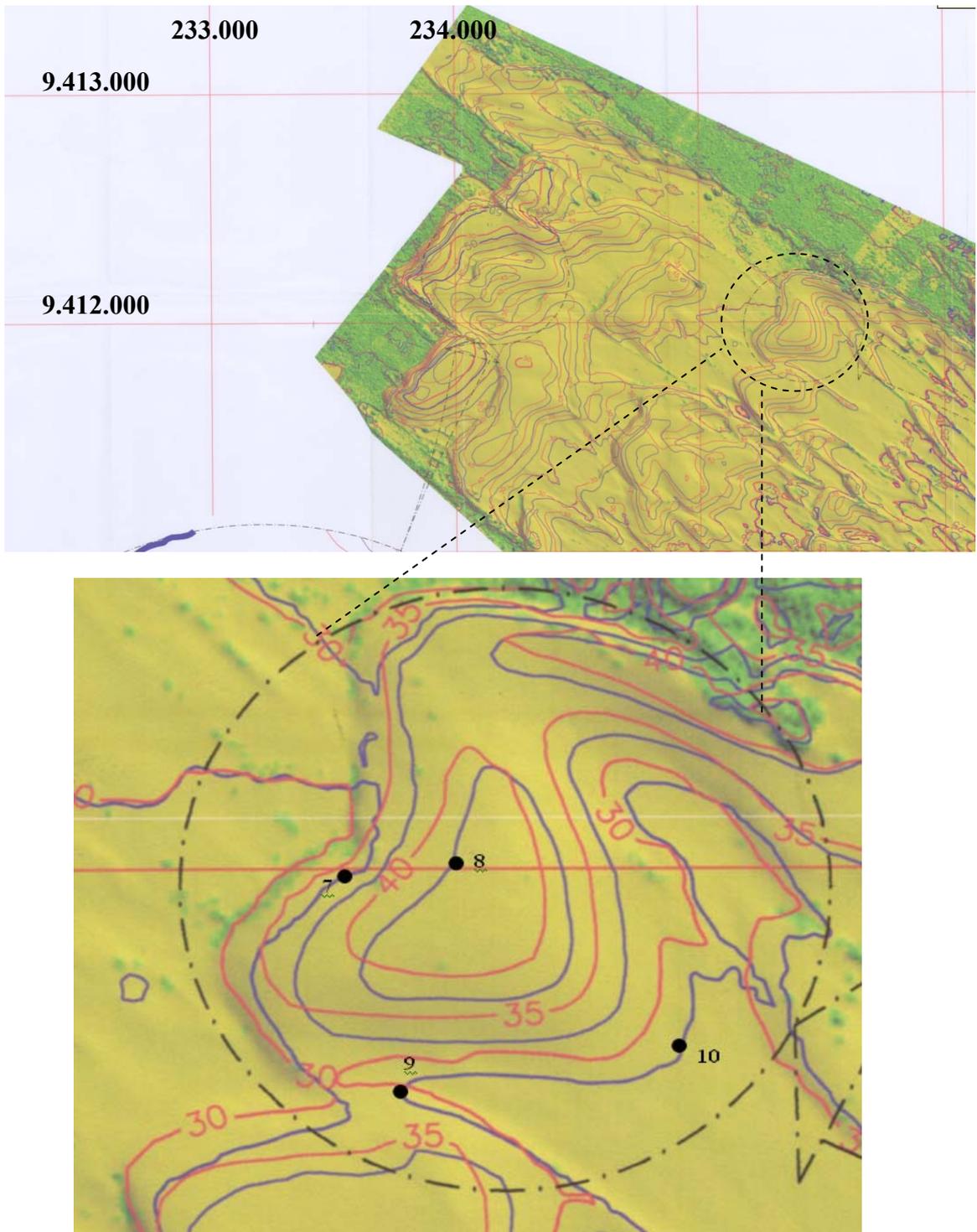


Figura 5.10 – Duna barcanoide posicionada quatro pontos distintos na escala 1:10.000 do recorte do mapa de deslocamento do campo de dunas (Anexo B)

A primeira duna selecionada é parabólica, e nela se posicionaram 6 pontos distintos; enquanto na segunda duna barcanoide, posicionaram-se 4 pontos, perfazendo, assim, um total de 10 pontos. Em seguida, elaborou-se a Tabela 5.1, com os 10 pontos distintos e as

respectivas coordenadas planialtimétricas; a morfologia das dunas e a velocidade de migração das dunas no período de dezembro/2001-novembro/2004. Constata-se que as dunas da área de estudo apresentam diferentes comportamentos quanto à velocidade de deslocamento anual e mensal. Isso se deve às diferentes características morfológicas, destacando também as diferentes dimensões dessas formas (altura, largura e comprimento) e volume de sedimentos; aliado à interseção ou interação de distintas dunas desse campo de dunas de Rio do Fogo, variação na direção e velocidade do vento, além da presença ou ausência de obstáculos ao longo do percurso de deslocamento.

Tabela 5.1 – Coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM), altitude, formas, deslocamento e velocidade do campo de dunas de Rio do Fogo em dez pontos distintos

Ponto	Coordenadas UTM	Altitude (m)	Formas das dunas	Deslocamento das dunas em metros 2001-2004	Velocidade de migração (m/ano)	Velocidade de migração (m/mês)
1	E= 234.025 N= 9.412.245	50	Parabólica	60,3	20,6	1,72
2	E= 234.120 N= 9.412.192	40	Parabólica	67,8	23,22	1,94
3	E= 234.198 N= 9.412.065	40	Parabólica	45,1	15,44	1,29
4	E= 234.202 N= 9.411.969	40	Parabólica	21,5	7,36	0,61
5	E= 234.365 N= 9.412.245	40	Parabólica	53,7	18,39	1,53
6	E= 234.195 N= 9.412.370	50	Parabólica	37,8	12,9	1,08
7	E= 235.325 N= 9.412.102	30	Barcanoide	35	11,99	1,00
8	E= 235.398 N= 9.412.008	40	Barcanoide	27,7	9,49	0,79
9	E= 235.352 N= 9.41.812	30	Barcanoide	49,8	17,05	1,42
10	E= 235.578 N= 9.411.886	30	Barcanoide	34,6	11,85	0,98

A Tabela 5.1 revela: (i) os pontos na duna parabólica, que se localiza na frente de migração do campo de dunas, apresentaram vetores de maior velocidade de migração no intervalo de 7,36 a 23,22 m/ano do que os vetores duna barcanoide, 9,49 m/ano a 17,05m/ano; (ii) o vetor de maior altitude foi o ponto 1 com 50 metros, localizado na duna parabólica, enquanto os pontos 7,9 e 10, localizados na duna barcanoide, experimentaram menor altitude, 30 metros; e (iii) o ponto 2 experimentou maior deslocamento, 67,8 metros, enquanto o ponto 4 experimentou o menor deslocamento 21,5 metros entre o período 2001-2004.

O Mapa da Figura 5.11 ilustra o relevo gerado por modelo digital do terreno (MDT) do campo de dunas móveis de Rio do Fogo para o ano de 2004; representa também o relevo por meio de cores entre os espaços das curvas de nível, que são coloridos segundo a legenda de elevação que apresenta a cor verde para as baixas altitudes e a cor castanha, até lilás, para maiores altitudes. Neste modelo de elevação encontram-se representadas as curvas de níveis; a de menor altitude encontrada foi de 25 metros enquanto a de maior altitude foi de 55 metros. Em seguida, calculou-se o volume de sedimentos deslocados, 2001 para 2004, que foi de 35.073.049,30 m³.

A duna parabólica, que se localiza na frente de migração do campo de dunas, apresentou maior velocidade que a duna barcanoide. Pode-se afirmar, portanto, conforme o estudo de Castro (2004), que diversos fatores ambientais influenciaram nos comportamentos distintos: (i) tamanho e altura das dunas; (ii) posição em relação à pista de vento (*fetch*); (iii) natureza tridimensional e volume dos depósitos.

Permitindo assim afirmar, que neste estudo a análise dos documentos, os mapas e vetores de deslocamento produzidos mostraram que as dunas tiveram uma migração horizontal no período de dois anos e onze meses, de 21,5 até 67,8 metros, e uma taxa de deslocamento anual variando de 7,36 m/ ano a 23,22 m/ano, enquanto a taxa de deslocamento horizontal mensal variou num intervalo de 1,25 m/ mês a 1,83 m/mês; no sentido predominante do vento SE-NW, ocorrendo, portanto, uma perfeita correlação entre os dados gerados e a direção dos ventos.

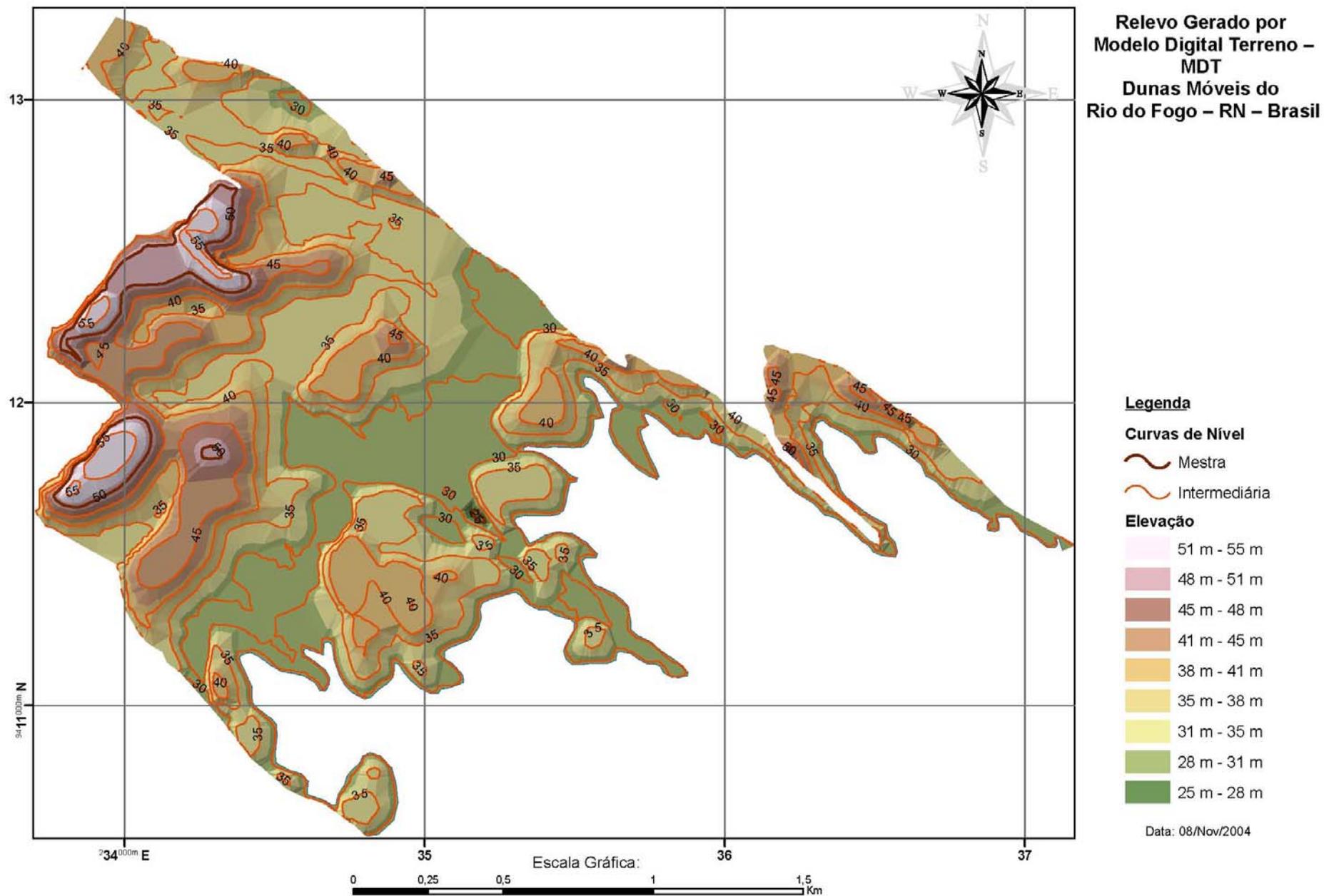


Figura 5.11 – Modelo digital do terreno (MDT) do campo de dunas móveis de Rio do Fogo, 2004 – RN, Brasil

5.3 MAPA DE USO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO

Diversas pesquisas, como a de Nunes (2008), enfatizam a importância de estudos que monitorem, identifiquem e analisem a degradação ambiental das dunas e lagoas naturais, em decorrência das diferentes formas de uso e ocupação antropogênica do solo, pela especulação imobiliária com vista aos empreendimentos turísticos, o que poderá contribuir para a destruição dessa paisagem e contaminação das lagoas e do aquífero subterrâneo no litoral potiguar. Nunes (2008), em sua investigação, recomendou a análise do diagnóstico ambiental das dunas e lagoas naturais; demonstrou um processo acelerado de ocupação antropogênica, em toda a área da pesquisa, por construção de residências das mais diversas categorias sociais, bem como de grandes projetos de hotéis e *resorts* internacionais.

Diante das evidências do alto risco nas áreas das lagoas, que, por exemplo, são alimentadas por águas de chuva de infiltração nas dunas, e também alimentam o aquífero subterrâneo, sendo, portanto, a fragilidade ambiental alta. Para tanto, elaborou-se o mapa de uso e ocupação da área da pesquisa, ou seja, área de influência do campo de dunas móveis, que perfaz uma área de 35,77 km².

Utilizando a base de dados gerados pelo sistema LIDAR (Figura 5.4 e Anexo A) e importando os arquivos para *software* ArcView, gerou-se o mapa de uso do solo (Figura 5.12).

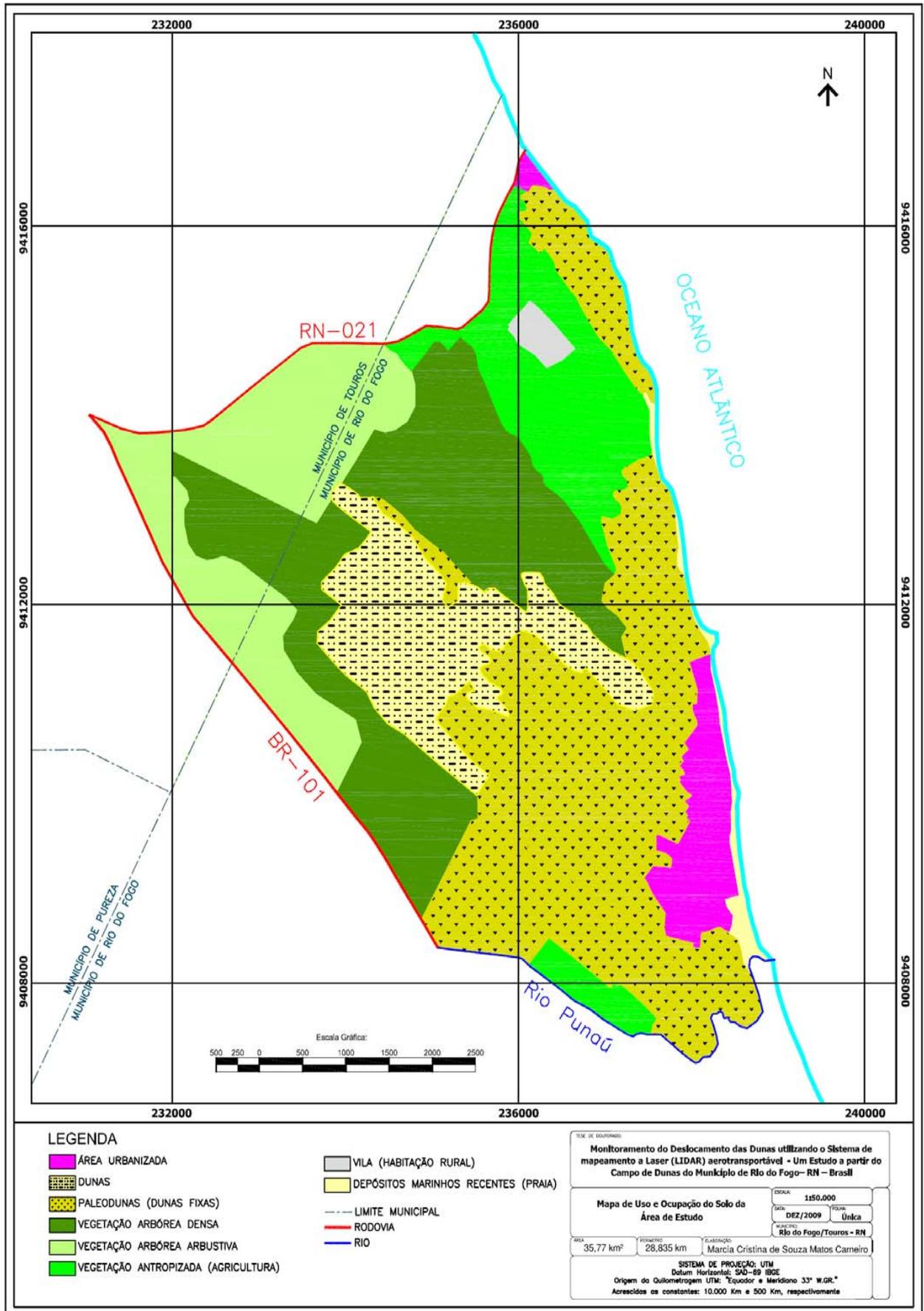


Figura 5.12 – Mapa de uso do solo da área de estudo

As classes, interpretadas, posicionadas e selecionadas no mapa, confirmaram-se com a visita ao campo; resultando nas seguintes classes do uso e ocupação do solo:

- a) vegetação arbórea densa; tem um solo ocupado com vegetação nativa e fechada, ocupam 23,59% da área mapeada;
- b) vegetação arbórea arbustiva, vegetação bem menos densa e espaçada aparece ocupando uma área de 13,59% da área da pesquisa;
- c) vegetação antropizada caracterizada na sua maior parte por uma agricultura de subsistência, que corresponde a 11,94%;
- d) dunas ativas ou móveis apresentam um solo sem vegetação (solo exposto); estão experimentando o transporte eólico, ocupam cerca de 14,84% da área do estudo e dominam a paisagem com dunas de até 55 metros de altura; deslocam-se de acordo com a intensidade dos ventos, entre outros fatores; na pesquisa, constatou-se um deslocamento no período de 2001 e 2004 de até 60 metros;
- e) paleodunas ou dunas fixas; região ocupada por antigas dunas de areia estabilizadas ou fixadas pela vegetação nativa, ocupam 28,88% da área da pesquisa;
- f) urbanizada – área urbanizada da cidade de Rio do Fogo e povoado de Zumbi, ocupando uma área de 5,03% da área da pesquisa;
- g) vila de assentamento do Incra, que ocupa 0,84%;
- h) depósito marinho recente corresponde aos cordões arenosos na faixa de variação da linha maré. Sua composição é essencialmente quartzosa, e não chega a ocupar 1,29% da área da pesquisa;
- i) fazendo limite com a área, existem RN-021 e BR-101, e também o Oceano Atlântico e o Rio Punaú, que se caracteriza como uso para pesca e recreação da população local e turista.

Todas as classes que representam feições relevantes da área da pesquisa foram identificadas, classificadas e calculadas em km².

Observa-se, na Tabela 5.2, que a maior área corresponde à classe de dunas fixas com 10,33 km² ocupando 28,88% da área estudada, enquanto as dunas móveis, representam 5,31 km², correspondendo a cerca de 14,84% da área do estudo. Constata-se, também, que a vila rural do Incra é a classe de menor representatividade, com uma área de 0,3 km², o que corresponde apenas a 0,84% da área da pesquisa. Somando as classes: área urbanizada, vila e vegetação antropizada, encontra-se uma área que está sofrendo maior pressão antrópica, e corresponde a cerca de 18% da área da pesquisa. Pode-se afirmar que, diante das evidências

de alta fragilidade ambiental que a área vem sofrendo, ainda é possível criar estratégias de preservação ambiental desse ecossistema.

Tabela 5.2 – Classes x área em km² x porcentagem da área total

Classe	Área em km ²	Porcentagem (%) da área total
Vegetação arbórea densa	8,44	23,59
Vegetação arbórea arbustiva	4,86	13,59
Vegetação antropizada	4,27	11,95
Dunas ativas ou móveis	5,31	14,84
Paleodunas ou dunas fixas	10,33	28,88
Área urbanizada	1,8	5,03
Vila	0,3	0,84
Depósito marinho recente (praia)	0,46	1,29

5.4 MAPA GEOMORFOLÓGICO

O mapa geomorfológico, conforme ilustra a Figura 13, foi elaborado segundo as recomendações da União Geográfica Internacional (UGI) e adaptando a legenda elaborada por Ferreira (2010). A base cartográfica utilizada foi a do mapa do Anexo A. A área de estudo compreende um conjunto morfológico estruturado por feições eólicas.

A caracterização e classificação das formas das dunas basearam-se no modelo digital do terreno aliado às imagens de nuvens de pontos LIDAR e complementadas por observações de campo. A compartimentação geomorfológica estruturou-se sobre um complexo morfológico composto por uma unidade morfoestrutural, a Planície de Acumulação Eólica (PAE) e de duas unidades morfoesculturais descritas a seguir: 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. A segunda unidade 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.

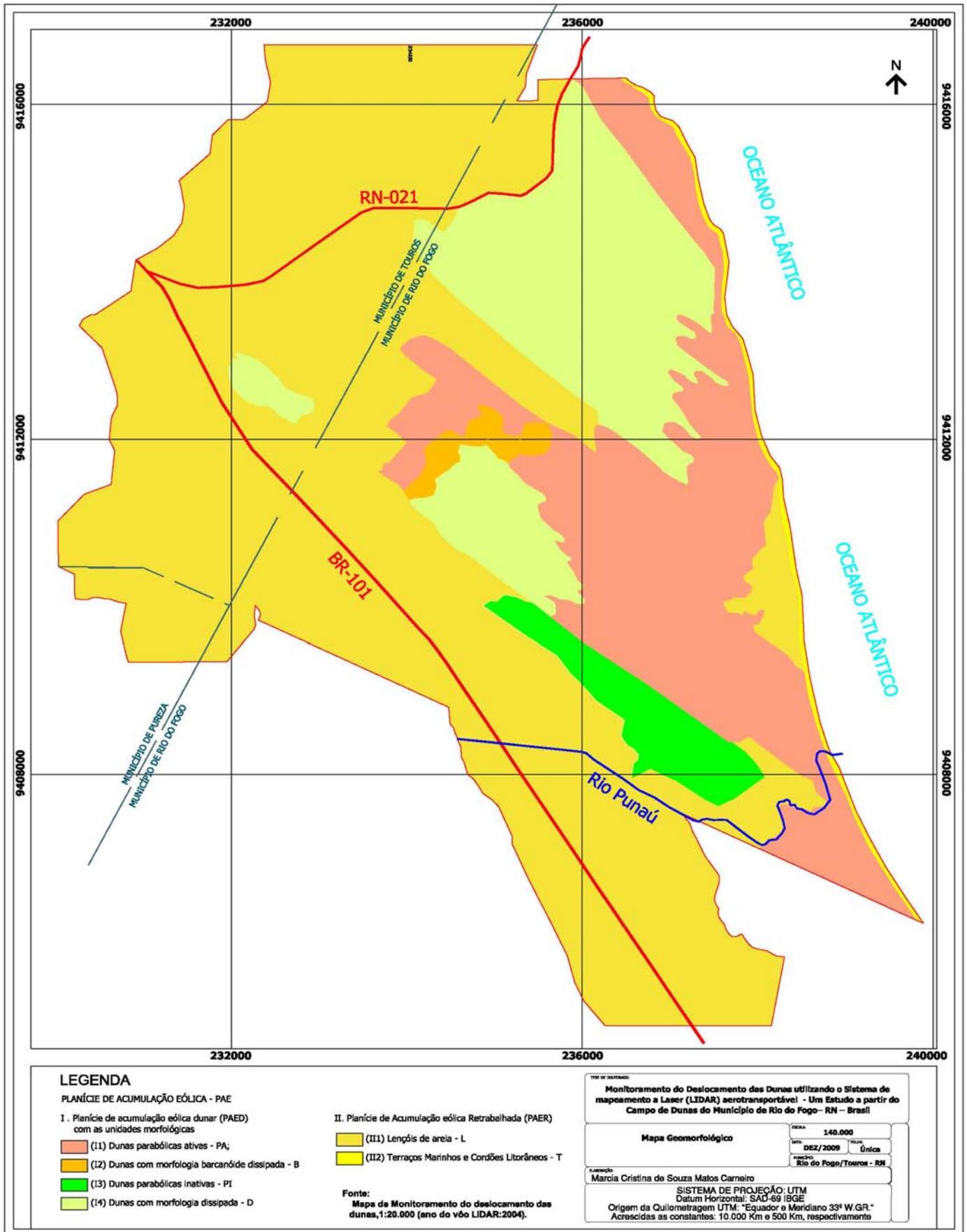


Figura 5.13 – Mapa geomorfológico

5.5 DISCUSSÃO

A avaliação das taxas de migração de dunas eólicas tem motivado uma série de autores a buscar, de acordo com cada caso específico, diferentes formas de mensurar o valor do transporte de sedimentos no sentido do avanço dessas formas de leito, a exemplo dos trabalhos realizados por Finkel (1959), Long & Sharp (1964), Wilson (1973), Fortes (1987), Tomazelli (1993), Jiménez *et al.* (1998), Maia (1998) e Carvalho (2003), entre outros.

Diversos procedimentos foram utilizados, desde medidas indiretas, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e fotografias aéreas, até medições diretas, realizadas em campo, usando como referência as marcas produzidas pelo deslocamento de dunas, além do monitoramento da movimentação de dunas a partir de pontos de amarração, sejam naturais, sejam implantados em campo (Carvalho; Maia & Dominguez, 2006).

As relações entre as formas e altitudes dos tipos de dunas e as respectivas taxas de migração, apresentadas na Tabela 5.1, a exemplo das barcanoides, geralmente exibem formas assimétricas de topo irregular, com trechos chapados ou escavados, associados a outros abaulados, que, também, podem ser interpretados como o desenvolvimento de *mega-ripples* ou pequenas dunas cavalgantes formadas sobre uma duna maior. Conjuntos de linhas ou faixas de deflação e de deposição situados no topo das barcanoides e transversas também são comumente observados. Essas dunas, em geral, são formadas pela junção lateral de barcanas, muitas vezes associadas a outras dunas do mesmo tipo ou diferentes que ocorrem lateralmente ou nas suas extremidades, a barlavento e a sotavento. Essas características contribuem para que elas experimentem maior interferência no processo de migração, provocado também pela presença de vegetação e umidade, ou multicausal.

Por outro lado, duna barcanoide, ilustrada na Figura 5.10, exhibe perfil mais próximo do modelo clássico de uma duna barcanoide, apresenta relações geométricas bastante semelhantes entre si, sendo considerada como exemplo de formas livres, portanto, experimenta menor interferência do meio circundante. Essas dunas barcanoides são classicamente identificadas como uma forma transversal produzida por ventos unidirecionais que, segundo Bagnold (1941), quando impulsionadas por ventos fortes e em movimento sobre um terreno plano, deslocam-se sem perder sua forma e volume.

A conservação dessas dimensões não constitui uma equação tão simples, como Goldsmith (1985) observa que a aerodinâmica e, portanto, a própria forma da duna, varia com

a velocidade do vento. Esse autor descreve que, sob ventos de baixa velocidade, o valor crítico da velocidade de cisalhamento necessário para remover e transportar sedimento não é alcançado, exceto próximo à crista da duna, fazendo com que haja transporte basicamente nessas imediações. Além disso, ressalta que, dessa forma, ventos de baixa velocidade apresentam uma tendência a produzir um achatamento do topo e da crista da duna, além do alongamento do seu perfil, enquanto em situação de ventos de alta velocidade, tende a prevalecer a retirada de materiais de barlavento em direção à face de sotavento (Carvalho; Maia & Dominguez, 2006).

No seu estudo, Carvalho, Maia & Dominguez (2006) afirmam que esse processo pode provocar a diminuição do comprimento da duna e aumento da sua altura. Adiciona-se a isso o processo de ancoramento da duna provocado por obstáculos, a exemplo de vegetação, umidade e pela aglutinação de dunas barcanas, como fatores determinantes da modificação de suas dimensões, aspecto esse bastante comum na região estudada.

Porém, Wilson (1973) alertou para o aspecto da interferência desempenhada pela forma das dunas sobre o fluxo de vento, o que resulta numa contínua interação do fluxo com a forma, de tal modo que se um sofre mudança o outro também deverá experimentá-la.

Long & Sharp (1964), entre outros, em suas pesquisas, observam que, para dunas barcanas, barcanoides e parabólicas, os elementos que exercem maior influência sobre sua movimentação são o regime de vento local, o suprimento de sedimentos, a topografia e a presença de vegetação. Ressaltam, no entanto, que o tamanho e, especialmente, a altura da face de deslizamento constituem os fatores mais importantes nesse processo.

De acordo com Carvalho, Maia & Dominguez (2006), a definição da estabilidade da forma dessas dunas envolve também o conceito de vetor resultante de transporte. Esse fator é verificado em campo, ou por meio de sensores remotos como imagens de satélite e fotografias aéreas, por meio das quais, é possível identificar coalescências desenvolvidas nas dunas do tipo barcana, cujo formato padrão se degenera a partir da variação nesse vetor, resultando em formas barcanoides, o que pode, entre outros, ser influenciado também pela presença de obstáculos à frente de migração dessas dunas.

De acordo com Carvalho, Maia & Dominguez (2006), as dunas sob influência de obstáculos ou confinadas sofrem influência das condições do vento aliada à presença de vegetação ou de zonas úmidas à frente da direção do deslocamento, resultando feições e dimensões mais deformadas, nas quais é comum observar coalescências nas cristas e braços, dissimetria nos flancos, desenvolvimento de escalonamento na face de deslizamento, entre outras deformidades.

As diferenças nas relações entre as dimensões das dunas, segundo Carvalho, Maia & Dominguez (2006), podem ser provocadas ou desenvolvidas, entre outros aspectos, pela coalescência resultante da deflação no topo da duna. Entretanto, esses autores afirmam que esse processo pode ser ocasionado:

(1) pela simples diminuição da velocidade do vento no local de ocorrência dessas dunas; (2) pelas mudanças na direção do vetor resultante do transporte; (3) devido à presença de obstáculos à frente do seu deslocamento, fazendo com que ocorra o ancoramento da duna e a consequente deflação no topo ou (4) pela interação e/ou progressiva aglutinação das extremidades de dunas contíguas. (Carvalho; Maia & Dominguez, 2006, p. 47).

Outro aspecto analisado é o processo de cavalgamento de dunas, que ocorre principalmente nas frentes do campo de Rio do Fogo, que, possivelmente, é responsável por um elevado de alterações no formato das dunas. Além disso, apesar de formarem um corpo único, em termos de definição de sua morfometria, essas dunas migram quase independentemente.

De acordo com Giannini *et al* (2005), os dois principais fatores controladores do tipo e das dimensões dos depósitos eólicos são os estoques de sedimentos disponíveis para o transporte eólico na direção predominante dos ventos. Segundo Short & Hesp (1982), o suprimento sedimentar é controlado pelo saldo de sedimentos existentes na porção emersa da praia, na dependência do aporte fluvial, do tipo morfodinâmico de praia e da fisiografia da plataforma continental interna, que, conforme estudo de Vital (2010), influencia a morfodinâmica em razão da presença ou não de rochas (recifes de arenito) na antepraia, por definir a orientação da linha de costa em relação ao ângulo de ataque das ondas e ao tipo de sedimento disponível à dinâmica marinha.

O campo de dunas localiza-se entre as Praias de Rio do Fogo e Zumbi, onde as variações morfodinâmicas refletem mudanças na morfologia tridimensional da praia que interferem no comportamento do fluxo aerodinâmico sobre o pós-praia e no potencial de deriva eólica (Short & Hesp, 1982; Davidson-Arnott & Law, 1990). No Rio Punaú, o aporte de sedimento pode ser mais intensificado sazonalmente nos estações mais chuvosas de maior precipitação pluviométrica; esse rio, como dito, contribui, ainda, para o fornecimento de sedimentos do campo de dunas, assim como os sedimentos que vão ser distribuídos ao longo da faixa costeira.

Na área de estudo, os ventos apresentam uma proveniência praticamente unidirecional do quadrante SE, com as maiores velocidades médias mensais de agosto a novembro. Os meses mais secos são outubro, novembro, dezembro com um total de precipitação média abaixo de 40 mm. Nesses meses de verão (novembro e dezembro), os voos LIDAR se

realizaram. Inicialmente, pela melhor visibilidade, já que o LIDAR mapeia as gotículas da chuva, e em razão do estudo de Diniz & Dominguez (1999), para quem esse cenário climático mostra um aumento significativo da deriva eólica potencial (DEP) no segundo semestre de cada ano, com picos no mês de novembro.

Nesse contexto, para que o campo de dunas mudasse de direção de deslocamento, precisaria haver uma mudança muito significativa na direção predominante dos ventos, no entanto, desde o fim do último glacial, reitere-se, a direção predominante dos ventos no Nordeste é de sudeste-noroeste (Bigarella, 1971), desencadeado pelos ventos alísios de sudeste advindos do anticiclone do Atlântico Sul.

Observa-se nos mapas dos Anexos A e B que as primeiras formações de dunas vegetadas formadas na parte superior do pós-praia são as dunas frontais estabelecidas ou as dunas embrionárias. Na superfície de deflação, as dunas frontais foram erodidas parcialmente pela morfodinâmica da barra do Rio Punaú, sendo ocupadas no entorno do leito desse rio próximo à praia por dunas com vegetação costeira arbórea de pequeno porte (Joly, 1997 *apud* Gianinni *et al*, 2005).

Ademais no mapa do Anexo A, pode-se afirmar que as frentes deposicionais parabólicas, em sua porção proximal, estão associadas a zonas de deflação, onde se encontram feições deposicionais vegetadas como dunas parabólicas e cordões de areia alongados gerados pelos rastros de deslocamento de dunas parabólicas, deixados a barlavento do campo de dunas móveis.

Além disso, o campo de dunas de Rio do Fogo as dunas móveis se deslocam próximo ao núcleo urbano do povoado de Zumbi, deixa no interior da planície de deflação dunas parabólicas vegetadas, e se deslocam em terrenos mais distantes da praia sobre a superfície dos tabuleiros.

Diversas gerações de dunas parabólicas alimentaram essa frente de dunas transgressivas a partir da superfície de deflação, deixando marcas residuais vegetadas de antigos rastros de deslocamentos menores. Em uma escala maior de magnitude (cf. mapa do Anexo A), observa-se que essa parabólica simples de braços alongados, também conhecida na literatura como *Hairpin* (grampo de cabelo) ou *longwalled* (Pye & Tsoar, 1990), apresenta um corpo único constituído por paredes alongadas vegetadas (rastro linear residual), uma bacia deflacional e um lóbulo de deposição (Pye & Tsoar, 1990 *apud* Hesp, 2001; Giannini *et al*, 2005).

Observando, ainda, nas imagens geradas pelo LIDAR (mapa na escala 1:20.000, Anexo A) e analisando o mapa geomorfológico, constata-se o conjunto de dunas parabólicas

(compostas) com várias frentes de migração. A essas primeiras parabólicas, sobrepõem-se outras mais jovens (parabólicas superimpostas) e então o perfil 1 (da página 93) mostra bem essa superimposição.

A vegetação vem fixando parcialmente essas dunas. Na frente do campo de dunas, encontram-se dunas parabólicas ativas. Outro aspecto se refere à frente de migração do campo de dunas que apresenta feições retas na sua porção sudoeste-oeste. Constata-se que a vegetação da frente da duna vem servindo de barreira natural à sua migração. Visualiza-se um comportamento diferente na frente de dunas na porção noroeste, onde o campo de dunas continua propagando-se e assume uma feição de barcana.

No nordeste desse campo de dunas, observa-se, ainda, uma nova frente de migração, surgida de uma segunda geração de dunas (Maia, 1998, p. 32), proporcionando fortes indicadores de mudança ambiental, ou simplesmente a presença de uma barreira à frente de migração, que possibilitou o surgimento de uma nova frente de migração. Essa frente a nordeste se relaciona com as dunas superimpostas, ou secundárias, pelo menos duas gerações de dunas.

O perfil 2 mostra (no mapa do Anexo B) que as dunas mais altas estão na porção centro-nordeste do campo de dunas; provavelmente essa área está mais exposta ao vento e tem menos barreiras. Outro fato muito marcante no perfil 1 (do mapa do Anexo B) é um forte rebaixamento das dunas da frente de migração pioneira. Esse tipo de rebaixamento é bem comum em processo de reativação de campos de dunas. Existe um grande adensamento de dunas barcanas.

As variáveis calculadas (vetores de deslocamentos das dunas e altitudes) aliadas à morfologia das dunas e observações em campo e nos mapas dos Anexos A e B fornecem fortes evidências de que esse complexo dunar continua sendo suprido de areia pela dinâmica da praia atual, em razão do retrabalhamento por ondas das dunas frontais na praia e disponibilidade de sedimentos fluviais. Independentemente do sistema costeiro, na bacia deflacional, existe o estoque de areias mais atuais, que retrabalhadas pela ação dos ventos, realimentam o lobo deposicional parabólico distal e cordões de precipitação laterais a sotavento. O conjunto enquadra-se na conceituação de dunas móveis, conforme consta no Decreto Federal n.º 5.300/2004, em seu artigo 2.º, inciso V: [...] “dunas móveis: corpos de areia acumulados naturalmente pelo vento e que, devido à inexistência ou escassez de vegetação, migram continuamente; também conhecidas por dunas livres, dunas ativas ou dunas transgressivas.” (Brasil, 2004).

O campo de dunas foi mapeado como uma unidade morfoestrutural (mapa geomorfológico) por abranger estruturas geológicas/geomorfológicas com interações funcionais e forte interdependência. O uso do campo de dunas de Rio do Fogo (bacias de deflação e dunas residuais parabólicas) compreende ambientes em que necessitam observar os fatores de preservação da paisagem dunar, manutenção das dunas residuais de deflação, preservação da qualidade do aquífero, manutenção do fluxo eólico natural e da vegetação (protegida por lei – Decreto Federal n.º 5.300, de 7 de dezembro de 2004, que regulamenta a Lei n.º 7.661 – Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC)).

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.

Outro aspecto relevante que ressalta a importância de proteção do ecossistema dunar, que não deveria ser negligenciado, é, segundo Heydorn & Tinley (1980), a manutenção da preservação do ciclo eólico natural do movimento das areias, que são mecanismos associados que alimentam as dunas costeiras. Por exemplo, os rios/estuários transportam sedimentos para o mar e os movimentos eólicos do ciclo da areia alimentam a praia, que alimentam as dunas, que alimentam os rios/estuários. É por essa razão que campo de dunas móveis ocorre com frequência associado à foz de rios e estuários.

Diversas pesquisas apontam a importância de conservar as paisagens costeiras naturais. Para tanto, evidenciam a importância e necessidade de criar grandes reservas costeiras preservando a morfologia praial e as espécies nativas desse ecossistema. Ressaltam-se as boas práticas e o modelo de preservação ambiental de dunas costeiras do Canadá a exemplo das dunas de Boustouche em parceria com a Empresa privada Irving em Prince Edward Island (PIE), as Dunas Cavendish, em que se destaca um livro sobre a preservação e importância do ecossistema dunar, e Greenwich – National Park of Canadá – ilustradas nas fotografias (Anexo D).

Este estudo recomenda que se preserve, na íntegra, o campo de dunas de Rio do Fogo, em consonância com a Resolução Conama n.º 341/2003 (Anexo C) e Legislações de proteção ambiental do Brasil (relacionadas no Anexo C), observando cuidados relativos a atividades de baixo impacto, desde que sejam ressaltados cuidados relacionados com a integridade desses geoecossistemas, tais como preservação da paisagem do campo de dunas; preservação da qualidade do aquífero, que no futuro serve como reservatório de água; manutenção do fluxo eólico natural e da vegetação protegida entre outros.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise tridimensional e multitemporais do campo de dunas de Rio do Fogo revelaram um modelo digital de elevação complexa da morfologia do campo de dunas, com diferentes tipos de dunas que migram ao longo do tempo.

Analisando os mapas de evolução do campo de dunas, o estudo destaca que ocorreu a migração horizontal das dunas no período 2001-2004. Ademais, essa migração foi constatada, medida e mensurada nesta pesquisa possibilitando concluir que as dunas tiveram uma migração horizontal no período de dois anos e onze meses, de 21,5 até 67,8 metros, o que permite concluir que o campo de dunas apresentou uma taxa de deslocamento anual variando de 7,36 m/ano a 23,22 m/ano, e uma taxa de deslocamento horizontal mensal que variou num intervalo de 1,25 m/mês a 1,83 m/mês no sentido predominante do vento SE-NW; tendo o volume de sedimentos deslocados de 2001 a 2004 de 44.661.592,58 m³, ocorrendo, portanto, uma perfeita correlação entre os dados gerados e a direção dos ventos.

Conclui-se também, observando as imagens geradas pelo LIDAR nos mapas dos Anexos A e B, que há um conjunto de dunas parabólicas (compostas) com várias frentes de migração. A essas primeiras parabólicas, sobrepõem-se outras mais jovens (parabólicas superimpostas). Conclui-se, ainda, que a vegetação vem fixando parcialmente essas dunas, servindo de barreira natural à sua migração. Na frente do campo de dunas, encontram-se dunas parabólicas ativas. Outro aspecto se refere à frente de migração do campo de dunas que apresenta feições retas na sua porção sudoeste-oeste. Visualiza-se um comportamento diferente na frente de dunas na porção noroeste, onde o campo de dunas continua propagando-se e assume uma feição de barcana.

Observando a Tabela 5.1, conclui-se: (i) os pontos na duna parabólica, que se localiza na frente de migração do campo de dunas, apresentaram vetores de maior velocidade de migração no intervalo de 7,36 a 23,22 m/ano do que os vetores duna barcanoide, 9,49 m/ano a 17,05m/ano; (ii) o vetor de maior altitude foi o ponto 1 com 50 metros, localizado na duna parabólica, enquanto os pontos 7,9 e 10, localizados na duna barcanoide, experimentaram menor altitude, com 30 metros; e (iii) o ponto 2 experimentou maior deslocamento, 67,8

metros; enquanto o ponto 4, experimentou o menor deslocamento, 21, 5 metros, entre o período 2001-2004. Conclui-se, ainda, de acordo com Castro (2004), que diversos fatores ambientais influenciaram nos comportamentos distintos: (i) tamanho, altura das dunas e localização no campo de dunas; (ii) posição em relação à pista de vento (*fetch*); (iii) natureza tridimensional e volume dos depósitos.

O estudo mais amplo sobre a evolução espaço-temporal do campo de dunas com a comparação entre diferentes recobrimentos aerofotogramétricos permitiu identificar a dinâmica das feições eólicas e a ocupação antrópica. Para tanto, utilizou-se a interpretação das fotografias aéreas de 1969 e da ortofotocarta de 2005, concluindo-se: (i) na fotografia aérea de 1969, toda a paisagem da área de estudo está ocupada pelo imenso campo de dunas de Rio do Fogo (dunas móveis desnudas de vegetação), enquanto na fotografia aérea de 2005, observa-se a redução da área do campo de dunas que foi ocupada pelo homem e pela vegetação arbórea arbustiva densa e espaçada; (ii) o conjunto de dunas barcanas e parabólicas vem sendo fixado pela vegetação. Essa fixação vem ocorrendo na frente de migração das dunas, pois a fotografia mais recente da frente de migração das dunas tem menos contornos, e elas estão mais arredondadas; (iii) nessas áreas sem cobertura vegetal observa-se continuamente um processo de ação eólica, provocando a mudança da paisagem, com a migração das dunas móveis, soterrando as paleodunas e provocando a exposição da Formação Barreiras; (iv) outro aspecto é o aumento da ocupação antrópica nas áreas urbanizadas – área urbanizada da cidade de Rio do Fogo e Zumbi.

No mapa geomorfológico, posicionaram-se e modificaram-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 coibam 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.

O mapa de uso do solo conclui que cerca de 18% da área da pesquisa encontram-se antropizados, demonstrando que ainda é possível criar estratégias de preservação ambiental desse ecossistema de grande fragilidade ambiental, porém de grande importância estratégica para o município. Isso se afirma, pois o governo do Rio Grande do Norte desenvolveu estratégia de desenvolvimento para todo o estado, e o município de Rio do Fogo está incluso no Plano de Desenvolvimento Integrado do Turismo Sustentável do Polo Costa das Dunas do estado. Esse plano apresenta as ações voltadas ao fomento do turismo no sentido de tornar o produto turístico potiguar competitivo. Torna-se fundamental, para o êxito do plano, a busca da qualidade na prestação de serviços e o correto gerenciamento dos recursos naturais e culturais por parte de todos os atores envolvidos no processo, quer sejam de natureza pública, quer privada.

Diversos fatores influenciam as formas das dunas, tais como a interseção ou interação de distintas dunas, variação na direção e velocidade do vento, além da presença ou ausência de obstáculos ao longo do percurso dessas formas de leito. As taxas médias anuais de migração de dunas dependem consideravelmente das dimensões dessas formas de leito, caracterizando-se uma correlação inversa entre a taxa de migração e parâmetros como volume e altura 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.

Nesse sentido, as evidências indicam que, para haver uma gestão ambiental sustentável na Unidade Ambiental Litorânea Eólica, é necessário mapear, monitorar e identificar os aspectos socioespaciais e naturais desse ambiente para garantir base de dados técnico-científicos utilizada no desenvolvimento de ações reguladoras que preservem essas áreas para gerações futuras.

RECOMENDAÇÕES

- 1) Elaborar um Plano de Manejo do Ecossistema Dunas, vinculado a um Conselho Gestor Público, o qual deverá estabelecer normas para os múltiplos usos, uma vez que essas dunas são consideradas de grande importância para garantir a sustentabilidade da Unidade Ambiental Litorânea Eólica.
- 2) Preservar, na íntegra, o campo de dunas de Rio do Fogo, em consonância com a Resolução do Conama n.º 341/2003 e Lei de Proteção Ambiental do Brasil, observando cuidados relativos a atividades de baixo impacto, desde que sejam ressaltados cuidados relacionados com a integridade desses geossistemas como preservação da paisagem do campo de dunas; preservação da qualidade do aquífero; manutenção do fluxo eólico natural e da vegetação protegida, entre outros.
- 3) Implantar uma política de conservação da faixa de praia, promovendo limitações legais de uso e ocupação do solo, que deverá induzir à preservação das características naturais, e não favorecer a instalação de obras ou estruturas que venham a comprometer cada vez mais o equilíbrio dessa área costeira. O campo de dunas de Rio do Fogo (bacias de deflação e dunas residuais parabólicas) que compreende ambientes em que há necessidade de se observar os fatores de preservação da paisagem dunar, manutenção das dunas residuais de deflação, preservação da qualidade do aquífero, manutenção do fluxo eólico natural e da vegetação (protegida por lei, Decreto n.º 5.300, de 7 de dezembro de 2004, que regulamenta a Lei n.º 7.661 – Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC).
- 5) Criar estratégias de preservação ambiental desse ecossistema diante da evidência de alta fragilidade ambiental que a área vem sofrendo.
- 6) Monitorar o campo de dunas de Rio do Fogo, criando assim bases de dados espaciais temporais para estudos de mudanças climáticas.
- 7) Analisar o planejamento, a execução, o processamento, a distribuição, a fiscalização e a formatação dos dados, bem como a manutenção e a calibração de todo o sistema e de seus integrantes individualmente. Sugere-se que a Comissão Nacional de Cartografia (Concar) reavalie a norma do padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) em relação aos dados obtidos por meio do levantamento que utiliza a tecnologia LIDAR.

8) Sugere-se aos poderes públicos municipais elaborar um plano diretor municipal único para os municípios dessa região, e plano diretor de esgotamento sanitário e de drenagem para a ocupação restrita a tão importante área litorânea.

REFERÊNCIAS

- Alves, A. L.; Amaro, V. E. & Vital, H., 2003. Application of remote sensing for monitoring and evaluation of coastal morphodynamic on the northeastern coast of Brazil: the Açu River Mouth Example. *Journal of Coastal Research*, SI 35 (Brazilian sandy beaches): 279-283.
- 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.
- Andersen, H.-E., McGaughey, R. J., Reutebuch, S. E., Carson, W. W. & Schreuder, G., (2004). Estimating forest crown fuel variables using LIDAR data. ASPRS Annual Conference, 2004, May, 23-27, Denver. *Proceedings...* Bethesda: MD7 American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. CD-ROM.
- Andrade, R. S., 1968. *Geologia e aspectos sedimentológicos da região costeira ao sul de Natal*. Relatório de Graduação, Escola de Geologia, UFPE, Recife.
- Araripe, P. T. & Feijó, F. J., 1994. Bacia potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 8(1): 127-141.
- Bagnold, R.A., 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Chapman & Hal, London, 265 p.
- Baltsavias, E. P. 1999, 15 jul. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Zurich, 54(2-3): 83-94.
- Barreto, A. M. F.; Suguio, K.; Bezerra, F. H. R.; Tatumi, S. H.; Yee, H. & 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.
- Bates, P. D.; Mason, D. C.; Cobby, D. M. & Horritt, M. S., 2003. Floodplain friction parameterization in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes*, 7: 1711-1732.
- Beatley, T., 1991. Protecting biodiversity in coastal environments: introduction and overview. *Coastal Manage*, 19: 3-19.
- Behan, A., Maas, H. G., Vosselman, G., 2000, Sept. 12-14. *Steps towards quality improvement of airborne laser scanner data*. In: Annual Conference of the Remote Sensing Society, 26., Leicester. Proceedings. CD-ROM, 9 p.
- Berlanga-Robles, C. A. & Ruiz-Luna, A., 2002. Land use mapping and change detection in the coastal zone of northwest Mexico using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research*, 18: 514-522.
- Bigarella, J. J. 1971. Variações climáticas no quaternário superior do Brasil e sua datação radiométrica pelo método do carbono 14. *Paleoclimas*, 1: 1-22.
- Bird, E. C. F., 2001. *Coastal geomorphology: an introduction*. J. Wiley & Sons.
- Branco, M. P. N. C.; Lehugeur, L. G. O. & 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, A. A., 2001. *Perfilamento a LASER: comparação com métodos fotogramétricos*. Congresso Brasileiro de Cartografia, 22., 2002, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, RS.

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. Decreto n.º 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo. Brasília, DF, 22 jul. 1984.

_____. Decreto n.º 5.300, de 7 de dezembro de 2004. Regulamenta a Lei n.º 7.661, de 16 de maio de 1988, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro - PNGC, dispõe sobre regras de uso e ocupação da zona costeira e estabelece critérios de gestão da orla marítima, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo. Brasília, DF, 8 dez. 2004.

_____. Lei n.º 7.661, de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 maio 1988a.

_____. Ministério do Exército. Diretoria do Serviço Geográfico. *Carta topográfica TOUROS MI 90*. Brasília, 1988b.

_____. Ministério do Meio Ambiente . Agenda 21. Brasília, 2002.

_____. Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro (Gerco). Brasília, 2000.

Burroughs, S. M.; Tebbens, S. F., 2008. Dune retreat and shoreline change on the Outer Banks of North Carolina. *Journal of Coastal Research*, 24(2B): 104-112.

Burtch, R., 2002, April. *LIDAR principles and applications*. In: *Imagin Conference: Geography on the Move*, Travers, MI, 13 p.

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 environment : an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coast line*. Academic Press, London.

Carvalho, A. M., 2003. *Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões-Costa NW do Estado do Ceará: ênfase nos processos eólicos*. Tese (Doutorado), Salvador.

Carvalho, A.; Maia, L. P.; Dominguez, J. L., 2006. *Caracterização do processo de migração das dunas de Flexeiras, Baleia, Paracuru e Jericoacoara, costa noroeste do Ceará*. Arquivo de Ciências do Mar. Ciên. Mar, Fortaleza, 2006, 39: 44-52.

Carvalho, R. G. de, Idelfonso, I. C. S., 2009. Problemas de uso e ocupação do solo e degradação ambiental no núcleo urbano de Tibau-RN. XIII SBGFA - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. Viçosa, MG.

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.

_____. 2004. Transporte de sedimentos e migração de dunas sobre o promotório de Paracaru: litoral setentrional do Nordeste brasileiro. *Boletim do Museu Nacional, Nova série. Geologia*, 72. Rio de Janeiro, Brasil, 617 p.

_____.; 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. v. 1: 505-508.

Collinson, J.D. & Thompson, D.B., 1982. *Sedimentary structures*. George Alen & Unwin, London, 194 p.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Serviço Geológico do Brasil, 2005. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Rio do Fogo, estado do Rio Grande do Norte*. CPRM/PRODEEM, Recife, 2005.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Resolução n.º 341, de 25 de setembro de 2003. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo. Brasília, DF, 3 nov. 2003, n. 213, Seção 1, p. 62.

Costa, M. I. P. & Perrin, P., 1981. Os sistemas de dunas litorâneas da região de Natal: granulometria e morfoscopia dos grãos de quartzo. In: Boletim do Departamento de Geologia, 1, Natal, CCE/UFRN: 1-5.

Costa, W. D., 1971. *Estudos hidrogeológicos de Natal–RN*. Contege/Caern, Natal.

Crombaghs, M. J. E.; Brugelmann, R. & De Min, E.J., 2000. On the adjustment of overlapping strips of laseraltimeter height data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/1): 224-331.

Cruz, A. da., 1996. Tourism and environment in the Mediterranean. In: Salman, A. H. P. M.; Langeveld, M. J. & Bonazountas, M. (eds.). Coastal management and habitat conservation. European Union for Coastal Conservation Congress, 4., 1993, Marathon, Greece. *Proceedings ...* v. 2: 113-116.

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.

Daigle, R.; Forbes, D.; Vasseur, L; Nichols, S; Bérubé, D.; Thompson, H. (eds)., 2006. *Impacts of sea level rise and climate change on the coastal zone of southeastern New Brunswick*. Government of Canada, Ottawa.

Davidson-Arnott, R. G. D & 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. & Carter, R.W.G. *Coastal dunes: form and process*. J. Wiley, Chichester, cap. 9: 177-200.

Davies, J. L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 8:127-142.

Dias, J. A.; Carmo, J. A. & Pollete, M., 2009, maio/may. As zonas costeiras no contexto dos recursos marinhos. *Revista de Gestão Costeira Integrada/ Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 9(1): 92-108.

Diniz, R. F. & 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.

Dominguez, J. M. L. & Bittencourt, A. C. S. P., 1996. Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in Northeastern Brazil. *Acad. Bras. Cienc.*, 68: 355-371.

Dote Sá, T. *et al.*, 2000. *Estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto ambiental do projeto de regeneração da Praia de Areia Preta*. Prefeitura Municipal, Natal:, v. 1-2.

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.

Ferreira, B., 2010. *Geologia, geomorfologia e paleontologia da margem pernambucana da Lagoa de Itaparica, NE do Brasil*. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação de Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Ferreira Júnior, A. V. 2005. *Mapeamento da zona costeira protegida por arenitos de praia (beachrocks) em Nísia Floresta, RN*. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Finkel, H. J., 1959. The barchans of southern Peru. *J. Geol.*, v. 67, p. 614-647.

Fisher, D. L., 1989. Response to coastal storm hazard: short-term recovery versus long-term planning. *Ocean and Shoreline Management*, 12: 295-308.

Flood, M., 2000, out. Airborne laser altimetry: a cost effective tool for mapping coastal zone topography. *ICZM Journal*, London, 2, seccion 4: 179-183.

Fortes, F. P., 1987. *Mapa geológico da Bacia Potiguar: a origem da Bacia Mesozóica do Apodi como decorrência do ciclo tecto-orogênético brasileiro: Relatório interno*. Petrobras/Debar/ Dinter, Natal.

Fowler, R., 2001. Topographic LIDAR. In: Maune, D. F. (ed.). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual*. ASPRS, Bethesda, cap. 7: 207-237.

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.

Fredericton. Fire Department, 2008. Map of areas of Fredericton in danger of flooding when St. John River level reaches 8.5 metres. Fire Department. Disponível em: <<http://www.fredericton.ca/en/publicsafety/2008MayFloodMap85.asp>>. Acesso em: 12 jul. 2010.

Galvin, C. J. 1975. Breaker type classification o three laboratory beaches. *Journal of Geophysical, Research*, n. 89, p. 1541-1549.

Geodetic Survey of Canada, 1987, fev. *Preliminary Recommendations for Establishment of GPS Calibration Basenets (Draft)*: Geodetic Survey Division, Surveys, Mapping and Remote Sensing Sector, Energy, Mines and Resources Canada. Ottawa.

Giannini, P. C. F.; Assine, M. L.; Barbosa, M. L.; Barreto, A.M.F.; Carvalho, A.M.; Claudino-Sales, V.; Maia, L.P.; Martinho, C.T.; Peulvast, J.P.; Sawakuchi, A.O. & Tomazelli, L. J., 2005. Dunas e paleodunas eólicas costeiras e interiores. In: Souza, C. R. G.; Suguio, K.; Oliveira, A. M. S. & Oliveira, P.E. (eds.). *Quaternário do Brasil*. Abequa, Ribeirão Preto.

Glennie, K. W., 1970. Desert sedimentary environments. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, *Developments in Sedimentology*, 14, 222 p.

Goeldner, C. R.; Richie, J. R. B. & McIntosh, W. R., 2002. *Turismo: princípios, práticas e filosofias*. Tradução de Roberto Cataldo Costa. 8. ed. Bookman, Porto Alegre.

Goldsmith, V., 1978. Coastal dunes. In: Davis, R. A. (ed). *Coastal sedimentary environments*. Springer-Verlag, New York, 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.

Haala, N. Combining multiple data sources for urban data acquisition. *Photogrammetric Week '99'*: 329-340.

Harding, D. J., 2002. *Principles of airborne laser altimeter terrain mapping*. NASA: Goddard Space Center. Disponível em: <www.gfsc.nasa.gov>. Acesso em: 15 jul. 2008.

Hensley, S.; Munjy, R. & Rosen, P., 2001. Interferometric synthetic aperture radar (IFSAR). In: Maune, D. F. (ed.). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual*. ASPRS, Bethesda, cap. 6: 142-206.

Hesp, P. A., 1981. The formation of shadow dunes. *Journal of Sedimentology Petrology*, 51: 101-112.

Heydorn, A. E. & Tinley, K. L., 1980. Estuaries of the cape. Part I: Synopsis of the Cape Coast. *CSIR Research Report*, 380, Stellenbosch.

Hoefel, F. G., 1998. *Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas: uma revisão bibliográfica*. Itajaí, SC: Univali.

Hopkinson, C. & Demuth, M. N., 2006. Using airborne LIDAR to assess the influence of glacier downwasting on water resources in the Canadian Rocky Mountains. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2): 212-222.

Houser, C.; Hapke, F.; Hamilton, S., 2008. Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. *Geomorphology*, 100: 223-240.

Hunter, R. E., 1977. Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, 24: 361-387.

IBGE, 1983, ago. Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos em território brasileiro. RPR no 22/83. *Boletim de Serviço*, .n. 1.602 (Suplemento). Rio de Janeiro.

_____, 2008. *Estimativas das populações dos municípios em 2008*. Rio de Janeiro.

IBGE, 1988, set. *Padronização de marcos geodésicos*. Norma de Serviço do Diretor de Geociências no 029/88. Rio de Janeiro.

_____, 1989, fev. *Parâmetros para transformação de sistemas geodésicos*. RPR no 23/89. Rio de Janeiro

_____, 1983. *Resolução PR n.º 22*, de 21 de julho de 1983. Estabelece as especificações e normas para levantamentos geodésicos em território brasileiro e efetua alteração no Apêndice II da Resolução da Presidência do IBGE N° 22, de 21/07/83, relacionada a Parâmetros para Transformação. Rio de Janeiro.

IBGE, 1989. *Resolução n.º 23*, de 21 de fevereiro de 1989. Altera o Apêndice II da R.PR-22/83. Rio de Janeiro.

_____. 1993. *Resolução n.º 5*, 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.

Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (Idema), 2002. *Atlas do Rio Grande do Norte*. Natal, RN.

Jiménez, A. J.; Maia, L. P.; Serra, J. & Morais, J. O., 1998. Dune migration along the Ceará coast, northeastern Brazil. *Sedimentology*.

Kim, H. *et al.*, 2000, May. *The fusion of photogrammetric image and laser scanning data*. In: ASPRS Annual Conference, Washington.

Lima, E. Q., 2010. *Vulnerabilidade Ambiental da zona costeira de Pititinga, Rio do Fogo, Rio Grande do Norte*. Dissertação (Mestrado) – UFRN, Centro de Ciências Exatas e da Terra Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal-RN.

Loch, C., 1982. Pesquisa de diversos sensores, Landsat, Radar e fotografias aéreas, bem como estudo de suas potencialidades aplicadas à interpretação geológica. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Long, J. T. & Sharp, R. P., 1964. Barchan-dune movement in Imperial Valley, California. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 75: 309-313.

Maas, H.G. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: user requirements and system performance. In: Photogrammetric Week (Ed. D. Fritsch), 49, 2003, Wichmann Verlag. *Proceedings...* Wichmann Verlag. p. 117-125.

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.

_____; Silva, A. C. & 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. & 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.

Marcelino, A. M. T. (Coord.). 1999. *Caracterização dos ecossistemas costeiros dos estados do Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí*. Disponível em: http://www.anp.gov.br/brnd/round5/round5/guias/sismica/refere/RegiaoNordeste_RGN_CE_PI.pdf>. Acesso em: 8 set. 2010.

McKee, E. D., 1983. Eolian sand bodies of the world. In: Brookfield, M. E. & Ahlbrandt, T. S. (eds.). *Eolian sediments and processes*. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, *Developments in Sedimentology*, 38: 1-25.

_____, 1979. Introduction to a study of global sand seas. In: _____ (ed.). *A study of global sand sea*. *U. S. Geol Surv. Prof. Pap.*, 1052: 187-238.

Meireles, Antonio Jeovah de Andrade, 2009, nov. *Parecer técnico-científico: diagnóstico ambiental e alternativas locais para as usinas eólicas, CGE RM cangalha e CGE RM boqueirão, projetadas em áreas de preservação permanente na planície costeira de Camocim/CE*. Fortaleza: Departamento de Geografia, UFC. Disponível em: <http://wp2.oktiva.com.br/portaldomar-bd/files/2010/08/Eolicas-CAMOCIM__.pdf>. Acesso em: 26 out. 2010.

Melo, J. G., 1995. *Impacto do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal/RN*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 196p.

Melvin, S. M.; Griffin, C. R. & MacIvor, L. H., 1991. Recovery strategies for piping plovers in managed coastal landscapes. *Coastal Management*, 19: 21-34.

Mercer, B., 2001. Comparing LIDAR and IFSAR: what can you expect? *Photogrammetric Week*, Stuttgart. 48: 227-237.

Mitasova, H; Bernstein, D.; Drake, T. G.; Harmon, R. & Miller, C., 2002a, September, 11-13. *Spatio-temporal analysis of beach morphology using LIDAR, RTK GPS, and open source GRASS GIS*. Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy.

_____; Drake, T. G.; Harmon, R. S., Bernstein, D., 2004. Quantifying rapid changes in coastal topography using modern mapping techniques and GIS. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(1): 1-11.

_____; Drake, T.; Harmon, R. S., Hofierka, J. & McNinch, J., 2002b, September, 11-13. *Spatio-temporal monitoring of evolving topography using LIDAR, Real Time Kinematic GPS and sonar data*. Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy.

_____; Hardin, E.; Overton, M. F.; Kurum, M. O., 2010. Geospatial analysis of vulnerable beach-foredune systems from decadal time series of LIDAR data. *Journal of Coastal Conservation*, 14: 161-172.

Mitasova, H; Mitas, L. & Harmon, R. S., 2005. Simultaneous spline interpolation and topographic analysis for lidar elevation data: methods for open source GIS. *IEEE Geosci Remote Sensing Letters*, 2(4): 375-379.

_____; Overton, M.; Recalde, J. J.; Bernstein, D. J.; Freeman, C. W., 2009. Raster-based analysis of coastal terrain dynamics from multitemporal LIDAR data. *Journal of Coastal Research*, 25(2): 207-215.

- Mont'Alverne, A. A. F.; Derze, G. R.; Morais, E. N. de & Barreto, A. M. *Mapa geológico do estado do Rio Grande do Norte*. DNPM, Natal, 1998. 1 mapa, color., 84 x 97 cm. Escala 1:500.000.
- Muehe, D. (org.), 2006. *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- _____. 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.
- _____. 2001. O litoral brasileiro e sua compartimentação. In: Guerra, A. *Geomorfologia do Brasil*. 2. ed., Editora Bertrand do Brasil, Rio de Janeiro, 273-337p.
- Nagihara, S.; Mulligan, K. R. & Xiong, W., 2004. Use of a three-dimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 391-398.
- National Geospatial-Intelligence Agency. *Datum transformations*. 2009. Disponível em: <<http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/datums/index.html>>. Acesso em: 19 dez. 2010.
- Nazaré Júnior, D. 1993. *Mapeamento geológico e gravimétrico da região de Natal*. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, CCE/UFRN, Natal.
- Nicholls, R. & Branson, J., 1998. Coastal Resilience and planning for an uncertain future: an introduction. *The Geographical Journal*, 164: 255-258.
- Nickling, W.G., 1983. Grain-size characteristics of sediment transport during dust storms. *Journal of Sedimentology Petrology*, 53: 1.011-1.024.
- Nogueira, A. M. B., 1981a. *O cenozóico continental da região de Natal*. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- _____. 1981b. O cenozóico continental da região de Natal. *Boletim do Departamento de Geologia*, 3: 15-24, Natal, CCE/UFRN.
- _____. 1982. O cenozóico continental da região de Natal. *Coleção Textos Acadêmicos*, 284(2): 119 p., Natal, CCE/UFRN.
- _____. Nascimento, J. M. S.; Lima, M. S.; Oliveira, M. I. M. & Srivastava, N. K., 1984. Geologia da faixa oriental entre Graçandu e Maxaranguape-RN. *Boletim do Departamento de Geologia*, 9: 25-30, Natal, CCE/UFRN.
- Nordstrom, K. F., 2000. *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge University Press, Cambridge, 338 p.
- Nordstrom, K. F., 2010. *Recuperação de praias e dunas*. Tradução Silvalves. (Oficina de Textos)., São Paulo, Brasil, 263 p.
- _____. & Mauriello, M. N. 2001. Restoring naturally-functioning landforms and biota on intensively develop barrier island under a no-retreat scenario. *Shore and Beach*, 69(3):1-28p.
- _____. Jackson, N. L.; Bruno, M. S.; and Butts, H. A. 2002. Municipal initiatives for managing dunes in coastal residential areas: a case study of Avalon. *Geomorphology*, 47: 137-152.

- Nunes, E. & Tavares, J. A., 2008. *Análise física e ambiental do ecossistema dunas e lagoas do litoral nordeste oriental, Rio Grande do Norte, Brasil*. In: Colóquio Internacional de Geocrítica, 10., Barcelona, Universidad de Barcelona, Espanha.
- Overton, M. F.; Mitasova, H.; Recalde, J. J.; Vanderbeke, N., 2006. Morphological evolution of a shoreline on a decadal time scale. In: McKee Smith, J. (ed.). *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, San Diego, California, 11: 3.851.
- Paiva, H. P., 2011. *Morfodinâmica de um campo de dunas eólicas costeiras no município de Maxaranguape*. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
- Pardo-Pascual, J. E.; García-Asenjo, L.; Palomar-Vázquez, J. & Garrigues-Talens, P., 2005. New methods and tools to analyze the beach-dune system evolution using real time kinematic global positioning system and geographic information systems. *Journal of Coastal Research*, SI 49: 34-39.
- Pereira, C. Q., 2006. *Modelagem numérica 3 D de parte do campo de Atafona, São João da Barra, RJ, e aplicações morfológicas*. Monografia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Pessoa Neto, O. C.; Soares, U. M. & Silva, J. G. F., et al., 2007. Bacia potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 357-369.
- Petrie, G., 2000, abr./maio. Warming up for the ISPRS Amsterdam: a look at current and future imagers, imagery & systems. *Geoinformatics Magazine*, Emmeloord, 3(3): 36-43.
- Petzold, B.; Reiss, P. & Stössel, W., 1999, 15 jul. Laser scanning: surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Zurich, 54(2-3): 95-104.
- Plano de Desenvolvimento Integrado do Turismo Sustentável do Pólo Costa das Dunas (PDITS). Natal, RN, setembro 2001. Disponível em: <<http://www.iadb.org/regions/re1/br/br0323/pditrn1.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2010.
- PNUD. IPEA. 2000. *Atlas do desenvolvimento humano no Brasil*. Rio de Janeiro. Disponível em: <www.pnud.org.br/atlas/>. Acesso em: 16 jul. 2010.
- 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.
- _____, 2003b. *Obras de proteção à praia de Boa Viagem: relatório de impacto ambiental - RIMA*, Prefeitura da Cidade do Recife, Secretaria de Serviço Público.
- Press, F.; Siever, R.; Grotzinger, J.; Jordan, T. H. 2006. *Para entender a Terra*. Tradução de Rualdo Menegati. Porto Alegre: Bookman.
- Pye, K. & Tsoar, H., 1990. Aeolian bedforms. In: _____. *Aeolian sand and sand dunes*. Cambridge University Press, London, 152-220.
- Reineck, H. E. & 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.

Ribeiro, G.P., 2007. *Avaliação da dinâmica do pontal arenoso e do campo de dunas em Atafona, São João da Barra (RJ), como requisito para interpretação do processo de erosão costeira*. Rio de Janeiro; Museu Nacional; Universidade federal do Rio de Janeiro.

_____.; Oliveira, C. S. & Bartel, B. F., 2005. Mapeamento da linha de costa associada à erosão em Atafona, São João da Barra, RJ. In: *Agenda Acadêmica*. Niterói, RJ: Universidade Fluminense.

Rio Grande do Norte. *Empresa de Pesquisa Agropecuária (Emparn)*, 2009. (Boletins de precipitações. Série: 1911-2009).

Rivas, R. A. N. & 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: <http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/227-SR25.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2010.

Sallenger, A.H.; Krabill, W.B., Swift, R.N.; Brock, J., List, J., Hansen, M.; Holman, R.A.; Manizade, S.; Sontag, J.; Meredeith, A.; Morgan, K.; Yunkel, J.K.; Frederick, E.B. & Stockdon, H., 2003. Evaluation of airborne topographic LIDAR for quantifying beach changes. *Journal of Coastal Research*, 19(1): 125–133.

_____.; Stockdon, H.; Fauver, L.; Hansen, M.; Thompson, D.; Wright, C.W. & Lillycrop, J., 2006. Hurricanes 2004: an overview of their characteristics and coastal change. *Estuaries and Coasts*, 29(6A): 880-888.

Santos, C. L. A.; Vital, H.; Amaro, V. E. & Kikuchi, R. K., 2007. Mapeamento de recifes submersos na costa do Rio Grande do Norte, NE Brasil: Macau a Maracajaú. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(supl. 1): 27-36.

Santos, M. C. N & Filgueira, M. F.; Costa, M. J., 1992. *Análise das condições ambientais das dunas ao sul de Natal-RN, em função do uso e ocupação do solo*. Monografia, Departamento de Geografia, CCHLA/UFRN, Natal, 89 p.

Santos, R. de L., Jr. & Mitishita, E. A. 2005. *Aerotriangulação de imagens obtidas com câmara não métrica e de pequeno formato apoiada com dados lidar*. Congresso Brasileiro de Cartografia, 22., Macaé. *Anais...* Macaé, 2005.

Saye, S. E.; Van Der Wal, D.; Pye, K. & Blott, S. J., 2005. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology*, 72(1-4): 128-155.

Seeliger, U.; Cordazzo, C.V.; Oliveira, C. P. L. & Seeliger, M., 2000. Longterm changes of coastal foredunes in the Southwest Atlantic. *Journal of Coastal Research*, 16(4): 1.068-1.072.

Sherman, D. J., 1995. Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology*, 124, 339-349.

_____. & Hotta, S., 1990. Aeolian sediment transport: theory and measurement. In: Nordstrom, K. F.; Psuty, N. P. & Carter, R. W. G. *Coastal dunes: form and process*. John Wiley. Chichester. cap. 2: p.17-37.

- Short, A. D. & 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.
- Silva, G. R., 2003. Características de vento da região Nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – CTG, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco.
- Silveira, I. M. & Vilaça, J. G., 1985. Nota prévia sobre as formas de relevo do litoral leste do Rio Grande do Norte. *Bol. do Depto. de Geologia*, 9: 57-60, Natal, CCE/UFRN.
- Slatton, K. C.; Crawford, M. M. & Evans, B. L., 2000. *Combining interferometric radar and laser altimeter data to improve estimates of topography*. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 24-28 Jul., Honolulu, p. 960-964.
- Souza C. R. de G.; Souza Filho, P. W. M.; Esteves, Sl.; Vital H., Dillenburg S.R.; Patchineelam, S. M.; Addad, J.E. 2005. Praias arenosas e erosão costeira. In: Souza, C. R. de G.; Suguio, K.; Oliveira, A. M. dos S.; Oliveira, P. E. de. (Ed.) *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto (SP): Holos. p. 130-152.
- Suguio, K. Introdução à sedimentologia. São Paulo, Edgard Blucher, 1973. 317p.
- Suguio, K. 1980. *Rochas sedimentares: propriedades, gêneses, importância econômica*. São Paulo, Editora Edgar Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo. 500p.
- Stockdon, H.F.; Sallenger, A. H., Jr.; Holman, R. A. & Howd, P.A., 2007. A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes. *Marine Geology*, 238: 1-20.
- _____; Sallenger, A. H., Jr.; List, J. H. & Holman, R. A., 2002. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic LIDAR data. *Journal of Coastal Research*, 18(3): 502-513.
- Teixeira, W.; Toledo, M. C. M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Tessler, M. G.; Goya, 2005. Processos costeros condicionantes do litoral brasileiro. *Revista do Departamento de Geografia*, 17:11-23.
- Thomas, D. S. G.; Stokes, S. & Shaw, P. A., 1997. A holocene eolian activity in the southwestern Kalahari Desert, southern Africa: significance and relationships to late pleistocene dune building events. *The Holocene*, 7: 273-281.
- Tinley, K. L., 1985. *Coastal dunes of South Africa*. África do Sul: South African National Scientific Programmers. (Report n.º 109).
- Toldo Jr., E.E. 1998. *Sedimentologia I*. Instituto de Geociências, Departamento de Mineralogia e Petrografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 52 p.
- Tomazelli, L. J., 1993. O regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, 20(1): 18-26.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Estação Meteorológica, 2005. *Boletim de Dados Meteorológicos de Natal, RN*.

Vilaça, J. G., 1986. *Geologia ambiental costeira da região de Extremoz - RN*. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 265 p.

_____; Nogueira, A. M. B.; Silveira, M. I. M.; Carvalho, M. F. & Cunha, E. M. S., 1986. Geologia ambiental da área costeira de Ponta de Búzios a Barra de Maxaranguape/RN. SBG/Núcleo Nordeste. Simp. Geol. NE, 12, João Pessoa, *Boletim 10*: 220-227.

Viles, H. & Spencer, T., 1995. *Coastal problems: geomorphology, ecology and society at the coast*. Arnold: London, UK, 350 p.

Villwock, J. A.; Lessa, G. C.; Suguio, K.; Ângulo, R. J.; Dillenburg, S. R., 2005. Geologia e geomorfologia de regiões costeiras. In: Souza, C. R. de G.; Suguio, K.; Oliveira, A. M. dos S.; Oliveira, P. E. de. (Ed.) *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto (SP): Holos. p. 94-113.

Vital, H., 2010. Characterization of the Brazilian continental shelf adjacent to Rio Grande do Norte State, NE Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58: 43-54.

Webster, T. L.; Forbes, D. L.; Mackinnon, E. & Roberts, D., 2006. Flood-risk mapping for storm-surge events and sea-level rise using LIDAR for southeast New Brunswick. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2): 194-211.

Wilson, I. G., 1973. Aeolian bedforms -their development and origins. *Sedimentology*, Amsterdam, v. 19, p. 173-210.

Woodroffe, C., 2002. *Coasts, form, process and evolution*. Cambridge University Press, United Kingdom.

Zanetti, M. A. Z. *Implicações atuais no relacionamento entre sistemas terrestres de referência de origem local e geocêntrica*. 2006. 111p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ANEXO A – Mapa do monitoramento de deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo
Escala: 1/20.000

ANEXO B – Mapa do monitoramento de deslocamento do campo de dunas de Rio do Fogo
Escala: 1/10.000

ANEXO C – Resolução Conama n.º 341/03

25 de setembro de 2003, publicada no DOU n.º 213, de 3 nov. 2003, Seção 1, p. 62

Correlações:

· Altera a Resolução n.º 303/02 (acrescenta novos Considerandos)

Dispõe sobre critérios para a caracterização de atividades ou empreendimentos turísticos sustentáveis como de interesse social para fins de ocupação de dunas originalmente desprovidas de vegetação, na Zona Costeira.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso das competências que lhe são conferidas pelos arts. 6.º e 8.º da Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto n.º 99.274, de 6 de junho de 1990, e tendo em vista o disposto nas Leis n.º 4.771, de 15 de setembro de 1965, 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e no seu Regimento Interno, anexo à Portaria no 499, de 18 de dezembro de 2002, e

Considerando o disposto no art. 1.º, § 2.º, inciso V, da Medida Provisória n.º 2.166-67/2001, que define interesse social; Considerando o disposto na Lei n.º 7.661, de 16 de maio de 1988, que estabelece o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), e dá outras providências, em especial o art. 3.º onde diz que o PNGC deverá prever o zoneamento de usos e atividades da Zona Costeira e dar prioridade à conservação e proteção das dunas, entre outros bens;

Considerando que as dunas desempenham relevante papel na formação e recarga de aquíferos;

Considerando a fundamental importância das dunas na dinâmica da zona costeira e no controle do processo erosivo;

Considerando a necessidade de controlar, de modo especialmente rigoroso, o uso e ocupação de dunas na Zona Costeira, originalmente desprovidas de vegetação, resolve:

Art. 1.º Acrescentar à Resolução CONAMA n.º 303, de 20 de março de 2002, publicada no Diário Oficial da União de 13 de maio de 2002, Seção 1, página 68, os seguintes considerandos:

“Considerando a conveniência de regulamentar os arts. 2.º e 3.º da Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, no que concerne às Áreas de Preservação Permanente;

Considerando ser dever do Poder Público e dos particulares preservar a biodiversidade, notadamente a flora, a fauna, os recursos hídricos, as belezas naturais e o equilíbrio ecológico,

evitando a poluição das águas, solo e ar, pressuposto intrínseco ao reconhecimento e exercício do direito de propriedade, nos termos dos arts. 5.º, *caput* (direito à vida) e inciso XXIII (função social da propriedade), 170, VI, 186, II, e 225, todos da Constituição Federal, bem como do art. 1.299, do Código Civil, que obriga o proprietário e posseiro a respeitarem os regulamentos administrativos;

Considerando a função fundamental das dunas na dinâmica da zona costeira, no controle dos processos erosivos e na formação e recarga de aquíferos.

Considerando a excepcional beleza cênica e paisagística das dunas, e a importância da manutenção dos seus atributos para o turismo sustentável.”

Art. 2.º Poderão ser declarados de interesse social, mediante procedimento administrativo específico o aprovado pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente, atividades ou empreendimentos turísticos sustentáveis em dunas originalmente desprovidas de vegetação, atendidas as diretrizes, condições e procedimentos estabelecidos nesta Resolução.

§ 1.^o A atividade ou empreendimento turístico sustentável para serem declarados de interesse social deverão obedecer aos seguintes requisitos:

I - ter abastecimento regular de água e recolhimento e/ou tratamento e/ou disposição adequada dos resíduos;

II - estar compatível com Plano Diretor do Município, adequado à legislação vigente;

III - não comprometer os atributos naturais essenciais da área, notadamente a paisagem, o equilíbrio hídrico e geológico, e a biodiversidade;

IV - promover benefícios socioeconômicos diretos às populações locais além de não causar impactos negativos às mesmas;

V - obter anuência prévia da União ou do Município, quando couber;

VI - garantir o livre acesso à praia e aos corpos d'água;

VII - haver oitiva prévia das populações humanas potencialmente afetadas em Audiência Pública; e

VIII - ter preferencialmente acessos (pavimentos, passeios) com revestimentos que permitam a infiltração das águas pluviais.

§ 2.^o As dunas desprovidas de vegetação somente poderão ser ocupadas com atividade ou empreendimento turístico sustentável em até vinte por cento de sua extensão, limitada à ocupação a dez por cento do campo de dunas, recobertas ou desprovidas de vegetação.

§ 3.^o A declaração de interesse social deverá ser emitida individualmente para cada atividade ou empreendimento turístico sustentável, informando-se ao Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA em até dez dias após a apreciação final pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente, de que trata o *caput* deste artigo.

Art. 3.^o As dunas passíveis de ocupação por atividades ou empreendimentos turísticos sustentáveis declarados como de interesse social deverão estar previamente definidas e individualizadas, em escala mínima de até 1:10.000, pelo órgão ambiental competente, sendo essas aprovadas pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente.

§ 1.^o A identificação e delimitação, pelo órgão ambiental competente, das dunas passíveis de ocupação por atividade ou empreendimento turístico sustentável declarados de interesse social deverão estar fundamentadas em estudos técnicos e científicos que comprovem que a ocupação de tais áreas não comprometerá:

I - a recarga e a pressão hidrostática do aquífero dunar nas proximidades de ambientes estuarinos, lacustres, lagunares, canais de maré e sobre restingas;

II - a quantidade e qualidade de água disponível para usos múltiplos na região, notadamente a consumo humano e dessedentação de animais, considerando-se a demanda hídrica em função da dinâmica populacional sazonal;

III - os bancos de areia que atuam como áreas de expansão do ecossistema manguezal e de restinga;

IV - os locais de pouso de aves migratórias e de alimento e refúgio para a fauna estuarina; e

V - a função da duna na estabilização costeira e sua beleza cênica.

§ 2.^o A identificação e delimitação mencionadas no *caput* deste artigo deverão ser apreciadas pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente com base no Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro, quando houver, e de acordo com o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, nos termos da Lei n^o 7.661, de 16 de maio de 1988.

Art. 4.^o Caracteriza-se a ocorrência de significativo impacto ambiental na construção, instalação, ampliação e funcionamento de atividade ou empreendimento turístico sustentável declarados de interesse social, de qualquer natureza ou porte, localizado em dunas originalmente desprovidas de vegetação, na Zona Costeira, devendo o órgão ambiental competente exigir, sempre, Estudo Prévio de Impacto Ambiental-EIA e Relatório de Impacto Ambiental-RIMA, aos quais dar-se-á publicidade.

Parágrafo único. O EIA/RIMA deverá considerar, em cada unidade de paisagem, entre outros aspectos, o impacto cumulativo do conjunto de empreendimentos ou atividades implantados ou a serem implantados em uma mesma área de influência, ainda que indireta.

Art. 5.^o Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

MARINA SILVA – Presidente do Conselho

Legislações de Proteção Ambiental do Brasil

Legislação federal:

Lei Federal 7661/1988 – Lei do Gerenciamento Costeiro

Lei Federal 9433/1997 – Plano Nacional de Recursos Hídricos

Lei Federal 9985/1997 – que regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza.

Resolução CONAMA 237/1997 – Estabelece critérios para expedição de licenças ambientais.

Decreto Federal 4340/2002 – regulamenta artigos da Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC.

Resolução CONAMA 303/2002 – Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente.

Resolução CONAMA 341/2003 – Dispõe sobre critérios para a caracterização de atividades ou empreendimentos turísticos sustentáveis como de interesse social para fins de ocupação de dunas originalmente desprovidas de vegetação, na Zona Costeira.

Decreto Federal 5300/2004 – dispõe sobre regras de uso e ocupação da zona costeira e estabelece critérios de gestão da orla marítima.

Resolução CONAMA 369/2006 – Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente-APP.

Legislação estadual:

Lei Estadual 6950/1996 – dispõe sobre o Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro.

Lei Estadual 7871/2000 – Zoneamento Ecológico-Econômico do Litoral Oriental do RN.

ANEXO D – Fotografias de dunas no Canadá



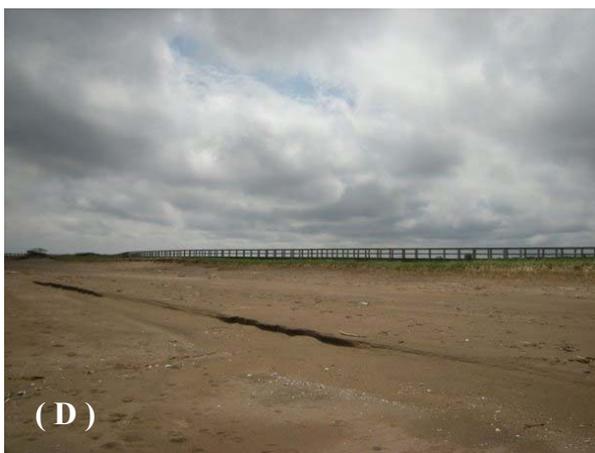
(A)



(B)



(C)

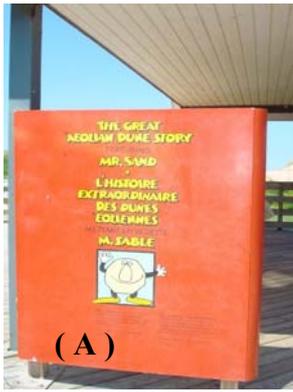


(D)



(E)

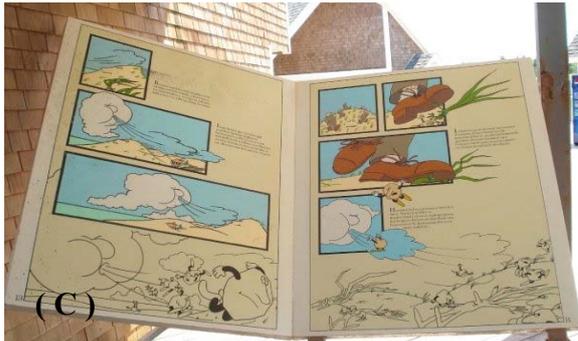
Dunas Bouctouche em New Brunswick, Canadá – (A) vista da passarela construída com o objetivo de evitar o pisoteamento do ecossistema; (B) palestra aos turistas sobre o ambiente das dunas; (C) vista da praia; (D) passarela vista da praia; (E) vista da planície de maré (*mudflat*); encontra-se nesse *habitat* uma espécie ameaçada de extinção *Piping Plover*. Existem laboratórios instalados onde se desenvolvem diversas pesquisas científicas. A área das dunas e seu entorno constituem um laboratório natural de ensino, de grande relevância ecológica; o ecoturismo é uma atividade permanente; e destaca-se por ser local de pouso de aves migratórias.



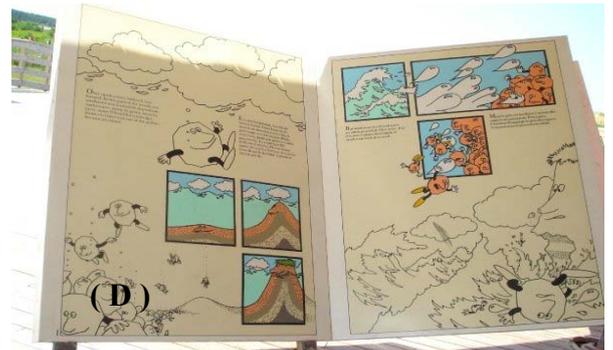
(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)

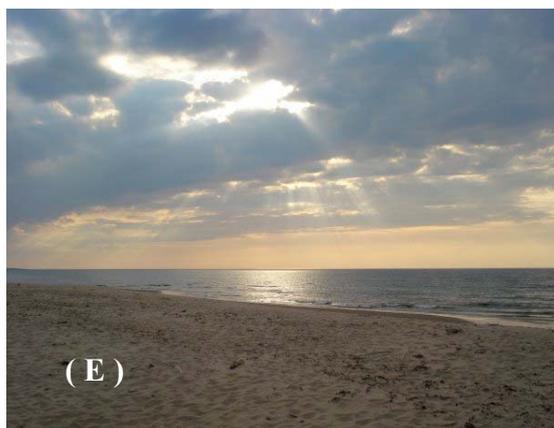


(G)



(H)

Dunas de Cavendish em Prince Edward Island (PEI), Canada – O ecoturismo é uma atividade permanente no verão. As fotografias (A), (B) e (C) mostram um exemplo de boa prática de conscientização da preservação ambiental do ecossistema de dunas costeiras. Construíram um livro do tamanho de um adulto, intitulado: A Grande História das Dunas Eólicas Contada pelo Senhor *Sand*; (D) vista da praia com presença de dunas. E) a (G) vista da passarela construída com objetivo de evitar o pisoteamento do ecossistema; (H) vista de pássaros pousando nas dunas. Diversos estudos comprovam que essas dunas são ambientes costeiros de pouso de aves migratórias.



Dunas de Greenwich – National Park of Canadá em Prince Edward Island (PEI) – Canada. O ecoturismo é uma atividade permanente no verão. As fotografias (A), (B), (C) e (D) mostram um exemplo de boa prática de conscientização da preservação ambiental do ecossistema do campo de dunas parabólicas na zona costeira da ilha; vista da passarela construída com o objetivo de evitar o pisoteamento do ecossistema; (E) vista das dunas com a vegetação preservada; (F) dunas preservadas com vegetação nativa.

ANEXO E - Relatório da Estação Geodésica SAT 92356

(Fonte: IBGE – DGC – Coordenação de Geodésia – Projeto Base de dados do SGB. Site : <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sgb.shtm>)



Relatório de Estação Geodésica

Estação :	92356	Nome da Estação :	92356	Tipo :	Estação Planimétrica - SAT
Município :	NATAL			UF :	RN
Última Visita :	15/10/2001	Situação Marco Principal :	Bom		
Conexões :	EP : 10479				

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	05 ° 47 ' 08,9801 " S	Altitude Ortométrica(m)	97,71	Gravidade(mGal)	
Longitude	35 ° 12 ' 25,2683 "W	Altitude Geométrica(m)	122,94	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
Origem	Ajustada	Data Medição	15/10/2001	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Cálculo	28/6/2010	Data Medição	
A Data Medição	15/10/2001	Sigma Altitude Geométrica(m)		Data Cálculo	
D Data Cálculo	15/3/2002	Modelo Geoidal	MAPGEO2010	Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)	0,013			Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)	0,013			Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	9.359.993,489			Densidade	
UTM(E)	255.596,330				
MC	-33				
Latitude	05 ° 47 ' 10,4020 " S	Altitude Ortométrica(m)	97,69	Gravidade(mGal)	
S Longitude	35 ° 12 ' 26,4279 "W	Altitude Geométrica(m)	92,79	Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
R Origem	Ajustada	Data Medição	15/10/2001	Datum	
C Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	28/6/2010	Data Medição	
A Data Medição	15/10/2001	Sigma Altitude Geométrica(m)	0,007	Data Cálculo	
S Data Cálculo	23/11/2004	Modelo Geoidal	MAPGEO2010	Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)	0,001			Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)	0,001			Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	9.359.951,862			Densidade	
0 UTM(E)	255.561,693				
MC	-33				

* Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996

** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006

*** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

Localização

Na laje da caixa d'água do edifício Ducal Center Palace, na Avenida Rio Branco nº 634, esquina com a Rua João Pessoa, no centro da cidade de Natal-RN.

Descrição

O marco principal é uma chapa de bronze padrão IBGE, estampada SB-25-1001, na laje na parte superior da caixa d'água. A estação de azimute é a RN 453-G, chapa a 9,90 m a SE da porta principal do prédio da Administração do Porto de Natal.

Foto(s)

