ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Análise multitemporal dos Lençóis Maranhenses entre 1984 a 2014 utilizando sensoriamento remoto orbital[1]

Thiago Diniz Araujo[2], Eliana Lima da Fonseca[3]

[1] Resultado da pesquisa de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).[2] Mestrando em Sensoriamento Remoto, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Campus do Vale, Caixa-Postal 15001, CEP 91501-970. Porto Alegre - RS – Brasil.[3] Doutora, Pesquisadora, Professora do Departamento de Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Autor correspondente E-mail: tdinizaraujo@gmail.com

Artigo recebido em 09/11/2015 e aceito em 19/01/2016

R E S U M O

A análise multitemporal possibilita comparar uma mesma paisagem entre dois ou mais períodos, auxiliando no monitoramento das suas dinâmicas. O objetivo deste artigo foi analisar a dinâmica de caráter espaço-temporal do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, mapeando as mudanças do sistema dunário a partir de imagens de satélite, no período de 1984 a 2014. Para esta análise foram utilizadas imagens de satélite adquiridas pelos sensores TM-Landsat 5 e OLI-Landsat 8. A borda limite do parque, na parte interior do continente, foi vetorizada para o ano inicial e final da análise, gerando mapas com o deslocamento das dunas no período de 31 anos o que permitiu identificar as áreas de avanço e retração do sistema dunário. A área total de avanço das dunas foi de 23,69 km² enquanto que a retração apresentou 14,95 km². Identificou-se expansão das dunas do litoral em direção ao interior do continente no sentido nordeste - sudoeste, seguindo a circulação dos ventos alísios. Foram selecionados quatro pontos de observações onde foram monitoradas as mudanças na cobertura do solo a partir da variação anual dos valores de reflectância da superfície na banda do infravermelho próximo, permitindo identificar o tipo de mudança quanto o tempo de ocorrência das mesmas.

Palavras-Chave**:** sensoriamento remoto, monitoramento ambiental, migração de sedimentos.

Spatio-temporal analysis of Lençóis Maranhenses between 1984 and 2014 using orbital remote sensing

A B S T R A C T

The multi-temporal analysis allows comparing the same landscape between two or more time periods, assisting in the monitoring of its dynamics. The objective of this study were to analyze the spatio-temporal dynamics of the Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, mapping the changes in the dunes system using satellite imagery, from 1984 to 2014. For this analysis were used satellite images acquired by TM-Landsat 5 and OLI-Landsat 8 sensors. The park boundary, in the inner part of the continent, was vectored for the initial and final year of analysis, generating maps with the changes in the dunes locations in the 31 years period identified the forward areas and retraction and areas. The total area of advancement of dunes was 23.69 km² while the downturn area was 14.95 km². It was identified expansion of coastal dunes toward the interior of the continent towards northeast - southwest, following the movement of trade winds. Were selected four points of observations which were monitored changes in land cover from the annual change of the surface reflectance values in the near infrared band, allowing identify both the type of change and its time of occurrence.

Keywords**:** remote sensing, environmental monitoring, migration of sediment.

Introdução

O homem desenvolveu ferramentas capazes de auxiliar na análise da dinâmica da superfície terrestre, como o uso das imagens de satélite por meio do sensoriamento remoto, na perspectiva de se obter maior controle sobre o meio. Segundo Morain (1998), o surgimento do sensoriamento remoto proporcionou uma nova compreensão do ambiente, possibilitando se desenvolver estudos em diversas escalas geométricas e de tempo, nas mais diferentes regiões do planeta, sendo uma ferramenta que

possibilita estudos em diferentes áreas do conhecimento, dentre as quais se destacam as geomorfológicas (Hugenholtz et al., 2012; Aydda; Algouti, 2014), geológicas (Mohamed; Verstraeten, 2012), climatológicas (Janke, 2002) e planejamentos socioambientais (Sparavigna, 2013). Em estudos de cunho ambiental, a análise multitemporal a partir das imagens de sensores remotos consiste em uma excelente ferramenta para auxiliar estudos geomorfológicos costeiros, ao estender informações pontuais de uma área para um contexto histórico (Trebossen et al., 2005). A análise multitemporal utiliza imagens de satélite de determinada área em períodos distintos, não se restringindo a usar imagens de um mesmo sensor na coleta de informações (Moreira, 2011).

A comparação de imagens de satélite obtidas em diferentes épocas possibilita evidenciar as alterações nos fluxos de matéria e energia nas zonas costeiras, as quais estão relacionadas aos processos energéticos, como a ação das ondas, das marés e da velocidade dos ventos, combinada com a disponibilidade de areia e da configuração geomorfológica (Meireles, 2014). As dunas são definidas como unidade geomorfológica de constituição predominantemente arenosa, com aparência de cômoro ou colina, produzida pela ação dos ventos, situada no litoral ou no interior do continente, podendo estar recoberta, ou não, por vegetação (resolução do CONAMA n° 303/2002). As dunas costeiras são influenciadas pela disponibilidade de sedimento inconsolidado, bem como pela intensidade de atuação e de duração do vento para remobilizar e transportar o sedimento do substrato, sendo que a existência de uma superfície plana também influencia na migração e formação das dunas (Goldsmith, 1978). Para uma eficaz forma de análise e manejo dos ecossistemas dunários é importante se compreender como este funciona e se desenvolve, na qual é necessário ordenar as ações humanas e planejar a construção de equipamentos e facilidades, de forma adequada, evitando efeitos negativos nos recursos naturais (Araujo; Sousa; Feitosa, 2011). A preservação desses ecossistemas é necessária, pois atuam na transição entre o ambiente marinho e o meio terrestre, proporcionando o equilíbrio dessas áreas (Carter, 1988).

Muitos estudos sobre dunas utilizando dados de sensoriamento remoto orbital têm sido realizados em diversos países, como por Jacobberger (1989) no ambiente dunário de Bahariya, no Egito, de Tombouctou, em Mali e de Tsodilo, em Botsuana. Por Janke (2002) nas dunas do Parque Nacional Great Sand Dunes, no Colorado, Estados Unidos. E também por Amirahmadi, Aliabadi e Biongh (2014), nas dunas a sudoeste de Sabzevar, Irã. No Brasil são realizados trabalhos em várias regiões, como por Tomazelli et al. (2008) nos campos de dunas do litoral norte do Rio Grande do Sul. Por Meireles, Silva e Thiers (2006) na dinâmica das dunas do município de São Gonçalo do Amarante-CE. Por Meireles (2011) na área de proteção ambiental que compreende os campos de dunas móveis de Jericoacoara-CE. Por Amaro et al. (2014), no ambiente costeiro de Ponta Negra em Natal-RN. Assim como em Silva e Dourado (2012) com a análise histórica da migração das dunas do Peró, Cabo Frio-RJ, ambos subsidiando o planejamento ambiental.

Dentre os sistemas de depósitos eólicos da zona costeira brasileira, o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses se destaca em área e volume de material, apresentando um dinâmico e representativo sistema de campos de dunas. Possui um contingente considerável de comunidades que sobrevivem do turismo e das produções primárias de subsistência, por isso há a necessidade de se estudar e monitorar este ambiente. O objetivo deste trabalho é analisar a dinâmica espaço-temporal da borda interna do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses mapeando as mudanças do sistema dunário a partir de imagens de satélite, no período de 1984 a 2014. Os resultados deste trabalho contribuirão na visualização do processo de deslocamento das dunas em um período de 31 anos, imprescindível para o planejamento ambiental.

Sensoriamento remoto no monitoramento de ambientes dunários

Entre os satélites de média resolução, os satélites da série Landsat são o que fornecem maior cobertura regional, tendo assim uma atrativa relação custo/benefício, sendo fonte de informações para muitas aplicações ambientais, pois possuem boa qualidade geométrica e radiométrica, tornando-se então uma ferramenta ideal em programas de monitoramento da superfície terrestre (Ehlers, 2007). Esses satélites possuem faixa de imageamento de 185 km, altitude de 705 km com inclinação de 98,20º e ciclo orbital de 16 dias (NASA, 2014). As tabelas 1 e 2 apresentam características do sensor *Thematic Mapper*(TM) a bordo do LANDSAT-5 e dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) a bordo do LANDSAT-8.

Tabela 1 -Características do sensor TM.

Sensor	Bandas espectrais	Resolução espectral	Resolução espacial
TM (Thematic Mapper)	Azul	0.45 - 0.52 µm	30 m
	Verde	0.52 - 0.60 µm	30 m
	Vermelho	0.63 - 069 µm	30 m
	Infravermelho Próximo	0.76 - 0.90 µm	30m
	Infravermelho Médio	1.55 - 1.75 µm	30 m
	Infravermelho Termal	10.4 - 12.5 µm	120 m
	Infravermelho Médio	2.08 - 2.35 µm	30 m

Fonte: Adaptado da USGS (2013).

Tabela 2 - Características dos sensores OLI e TIRS.

Sensor	Bandas espectrais	Resolução espectral	Resolução espacial
OLI (Operational Land Imager)	Costal	0.433 - 0.453 µm	30 m
	Azul	0.450 - 0.515 µm	30 m
	Verde	0.525 - 0.600 µm	30 m
	Vermelho	0.630 - 0.680 µm	30 m
	Infravermelho Próximo	0.845 - 0.885 µm	30 m
	Infravermelho Médio	1.560 - 1.660 µm	30 m
	Infravermelho Médio	2.100 - 2.300 µm	30 m
	Pancromático	0.500 - 0.680 µm	15 m
	Cirrus	1.360 - 1.390 µm	30 m
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	LWIR – 1	10.30 - 11.30 µm	100 m
	LWIR – 2	11.50 - 12.50 µm	100 m

Fonte: Adaptado da USGS (2013).

Os sistemas de sensores remotos registram as informações espectrais nas diferentes faixas do espectro eletromagnético, favorecendo a identificação dos diversos alvos na superfície terrestre. Estes alvos possuem diferentes respostas espectrais, que podem ser alteradas com o tempo em decorrência de fatores externos ou próprias de sua natureza (Novo, 2010). O comportamento espectral dos alvos pode ser apresentado por meio da reflectância, sendo que esta consiste na razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (irradiância), medidas no mesmo instante de tempo (Meneses, 2012). Os sensores detectam a radiância, convertendo essa grandeza em número digital. Para o cálculo da reflectância é necessário inicialmente calcular a radiância, a partir da relação linear entre o número digital e essa grandeza, considerando os parâmetros de calibração do sensor. Os valores da reflectância é a melhor forma de monitorar o comportamento de um objeto, em que mudanças na sua resposta espectral estariam relacionadas às suas propriedades estruturais e materiais e não às mudanças no ângulo de iluminação solar (Shaw; Burke, 2003).

O cálculo da reflectância (ρ) pode ser obtido de acordo com Allen, Tasumi e Trezza (2002), a partir da Equação 1.

$$\rho\lambda i = \frac{\pi \, . L\lambda i}{k\lambda i \, . cosZ \, . dr} \qquad (1)$$

Em que:

- Lλi é a radiância espectral de cada banda;
- kλi é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Wm-2 µm-1);
- Z é o ângulo zenital solar;
- dr é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol.

Conforme Iqbal (1983), o cálculo da dr é estabelecido em unidade astronômica (UA). Ela é apresentada na Equação 2.

$$dr = 1 + 0{,}033cos\left(\frac{DJ2\pi}{365}\right) \qquad (2)$$

Em que:

- DJ representa um dia Juliano do ano.

O ângulo zenital foi obtido conforme a Equação 3.

$$Cos\ Z = \ cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \qquad (3)$$

Em que: E é o ângulo de elevação do sol, obtido no cabeçalho de cada imagem.

A refletividade da superfície terrestre quando extraídas dos satélites, pode ser apresentada a partir dos valores de reflectância aparente e reflectância de superfície. Para a obtenção da reflectância aparente não é necessário realizar as correções atmosféricas, resultando apenas da conversão dos números

digitais de uma imagem em valores de reflectância. Já para a obtenção da reflectância de superfície é imprescindível aplicar as devidas correções atmosféricas, para se retirar a contribuição da atmosfera do valor de cada pixel, através da modelagem da interação da radiação eletromagnética com os gases atmosféricos radiativamente ativos (Slater, 1980).

Aplicada em estudos com ecossistemas de dunas, a reflectância de superfície apresenta grande eficiência no monitoramento dos deslocamentos das areias, utilizando-se os comprimentos de onda do visível e principalmente do infravermelho próximo, pois é a que menos é afetada pelas distorções causadas pela atmosfera (Levin; Ben-Dor; Karnieli, 2004). Parte significativa dos trabalhos com dunas está focada em métodos quantitativos, para determinar a direção, padrão morfológico e o deslocamento dos sedimentos, através das imagens de satélites (Hugenholtz et al., 2012). As análises apresentam resultados positivos mesmo quando em áreas heterogêneas, com dunas de diferentes morfologias e presença de cobertura vegetal (Mohamed; Verstraeten, 2012).

Área de estudo

A área de estudo é o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM), que pertence à região nordeste do Brasil, litoral oriental do Estado do Maranhão, especificamente situado na Mesorregião Norte Maranhense e Microrregião dos Lençóis Maranhenses (IBGE, 2002). Tornou-se território de proteção ambiental por meio do Decreto Federal nº 86.060, de 02 de junho de 1981 (BRASIL, 1981). Apresenta extensa área que compreende 155.000 ha, abrangendo os municípios de Santo Amaro, Primeira Cruz e Barreirinhas, com coordenadas geográficas de 02º 19’ S a 02º 45’ S e 42º 44’ W a 43º 29’ W. Seu limite a norte é com o Oceano Atlântico, a sul com Santo Amaro e Barreirinhas, a leste com Paulino Neves, e a oeste com Primeira Cruz e Santo Amaro (IBAMA, 2003), apresentado na Figura 1.

Em virtude de sua natureza e extensão espacial, os Lençóis Maranhenses segundo Gonçalves et al. (2003), exibem o maior registro de sedimentação eólica do Quaternário encontrado na América do Sul. Estendem-se ao longo de aproximadamente 75 km do litoral maranhense e penetram o interior do continente por distâncias superiores a 20 km em alguns pontos (Levin et al., 2008). A planície costeira em que está inserido apresenta um relevo suave a moderadamente ondulado, no qual são comuns extensos campos de dunas móveis de diversas configurações, onde se destacam as seguintes entidades morfológicas: praias, lençóis de areia, pontais, cordões, terraços arenosos, planícies de deflação, inundação e maré, além dos diversos tipos de dunas (Santos; Santos, 2015).

O parque possui condições edáficas de solo arenoso, ventos, temperatura, salinidade, solo instável, insolação forte e direta. Características que favorecem a ocorrência e predomínio da vegetação de restinga, distribuída por toda sua área. As areias do PNLM possuem diâmetro médio da partícula de ocorrência mais frequente compreendido entre 0,177 a 0,125 mm e 0,354 a 0,250 mm, referente a areias finas e médias, respectivamente.Os sedimentos arenosos diminuem seu diâmetro à medida que se afastam da linha de costa, confirmando a significativa capacidade de transporte dos ventos alísios de NE na modelagem das feições morfológicas. (IBAMA, 2003).

A precipitação pluvial na região é caracterizada por valores máximos de fevereiro a maio, chovendo cerca de 90% do total anual e mínimos de agosto a dezembro, chovendo apenas 10% do total anual (MARANHÃO, 2003). Consequência da elevada umidade do ar e da variação das perturbações de correntes, a precipitação apresenta totais pluviométricos anuais que variam de 1.473 mm a 1.623 mm no PNLM (IBAMA, 2003). A hidrografia do parque é composta por rios, lagos, lagoas e lagunas, os quais são importantes no controle da movimentação eólica, que segundo Santos e Santos (2015) dificultam a migração das dunas sobre as paleodunas e sobre as planícies de deflação eólica sub atuais, situadas contiguamente à frente das dunas móveis.

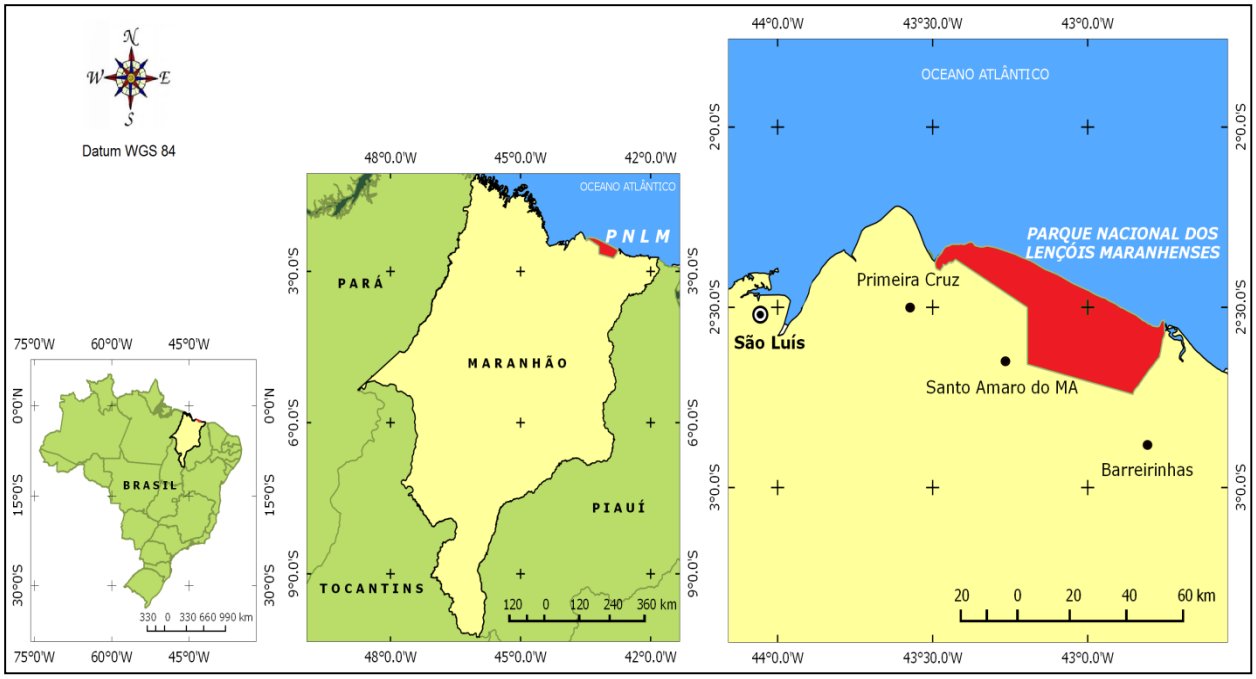

Figura 1: Mapa de localização do PNLM.

Material e métodos

A aquisição das imagens seguiu uma sazonalidade, uniformizando a escolha das datas analisadas para um mesmo período do ano e também para obtenção de uma menor cobertura de nuvens, visando a diminuição dos efeitos de diferença de iluminação da cena que podem influenciar na análise das imagens (Jensen, 2009). Correspondem aos meses de estiagem pluviométrica da região ou aqueles mais próximos deste período, que geralmente se caracteriza de agosto a dezembro (MARANHÃO, 2003). Os produtos escolhidos têm como nível 1 de correção do sistema, fornecendo precisão radiométrica e geométrica (USGS, 2013). Foram adquiridas gratuitamente através do acervo da *United States Geological Survey* (USGS), correspondendo a órbita 220, ponto 062, sendo adquirida uma imagem para cada ano analisado entre o período de 1984 e 2014. As primeiras vinte e oito imagens da série temporal foram adquiridas pelo sensor TM-LANDSAT 5 e as duas finais foram adquiridas pelo sensor OLI-LANDSAT 8. Não foi encontrada imagem para a área de estudo com as características previamente definidas para o ano de 2012. As imagens utilizadas possuem resolução radiométrica de 8 bits no LANDSAT-5 e de 16 bits disponibilizada pelo LANDSAT-8 (USGS, 2014). Através do software Qgis 2.2.0 Valmiera as imagens do sensor OLI foram convertidas 16 bits para 8 bits, padronizando todas as cenas em um mesmo nível de sensibilidade radiométrica. O interpolador vizinho mais próximo foi utilizado para reamostragem, evitando alteração dos valores dos níveis de cinza dos pixels.

Para se mensurar o deslocamento dunário na borda interna do PNLM utilizou-se o método de interpretação visual de imagens, seguindo-se as prerrogativas da análise da morfodinâmica. Segundo Meireles (2011), esta análise se constitui no sentido que as dunas se posicionam conforme o seu contorno morfológico, sendo possível identificar e medir as migrações dunárias. Consideram-se as distâncias entre as marcas que possuem formas de arcos, possíveis de ser identificadas na imagem de satélite (Carvalho; Maia; Dominguez, 2006). Para esse fim foi criado um banco de dados georreferenciados no software Spring 5.2.6, tendo como parâmetros geodésicos Datum WGS84 e projeção UTM fuso 23S, no qual foram integradas as imagens de satélite adquiridas no dia 20/06/1984 e 25/07/2014, que correspondem ao extremo da série temporal. Utilizou-se nas imagens a composição colorida RGB para as bandas com comprimentos de onda do infravermelho médio, infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente. De acordo com Rocha (2000) essa combinação mostra mais claramente os limites entre o solo e a água, com a vegetação mais discriminada.

Foram selecionados quatro pontos para análise anual da variação da reflectância de superfície, visando identificar o ano da

ocorrência da mudança da cobertura do solo. Para a seleção dos pontos foi considerada a relevância dos mesmos para a região, como cidade próxima ao parque, lagoas de visitações turísticas e área de considerável circulação veicular até a zona praial. A identificação, posição e descrição do ponto encontram-se na Tabela 3. As coordenadas foram coletadas com o auxilio de um receptor GPS portátil. A realização da pesquisa de campo possibilitou o registro fotográfico dos pontos de observações apresentados na Figura 2, assim como na contribuição da percepção e descrição geomorfológica do ambiente.

O comportamento espectral dos pontos de observações foi avaliado pelos valores de reflectância de superfície da banda do infravermelho próximo, a qual entende-se que é a melhor faixa espectral para se obter a reflectância da areia de dunas (Levin; Ben-Dor; Karnieli, 2004). A reflectância de superfície foi calculada a partir do software ENVI 4.7, a partir dos parâmetros de calibração de cada sensor. As correções atmosféricas foram feitas no módulo FLAASH, que conforme Perkins (2012) fornece algoritmos precisos para atenuar os efeitos da atmosfera nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo. Ele baseia-se em um modelo físico de transferência radiativa, o MODTRAN4 (ITT, 2009), que neste trabalho empregou o modelo atmosférico Tropical e o modelo aerossol Marítimo, com valor inicial de visibilidade de 40 km. Devido à ausência de imagens do LANDSAT para a área de estudo em 2012, estimou-se a reflectância de superfície para este ano a partir de uma média aritmética dos resultados alcançados entre os anos de 2011 e 2013.

Figura 2: Áreas de observações no PNLM. (A - Santo Amaro; B - lagoa da Esperança; C - lagoa Azul; D - próximo ao Atins).

Tabela 3 – Pontos de observações no PNLM

Ponto	Coordenadas geográficas	Nome
1	2° 30’ 26.9” S / 43° 14’ 12.7” W	Santo Amaro
2	2° 41’ 15.5” S / 43° 2’ 5.5” W	Lagoa da Esperança
3	2° 40’ 0.3” S / 42° 51’ 14.5” W	Lagoa Azul
4	2° 37’ 6.24” S / 42° 45’ 31.13” W	Próximo ao Atins

Resultados e discussão

Cálculo da área total de deslocamento dunário

O sistema dunário apresentou entre o período de 31 anos analisados (1984 a 2014) comportamento tanto de avanço quanto de retração, em diferentes posições ao longo da borda interna. Houve um acréscimo de 23,69 km² na área do sistema dunário, enquanto que a retração apresentou uma área menor, com apenas 14,95 km². Os posicionamentos das alterações observadas estão apresentados na Figura 3.

Foi observado que o deslocamento das dunas foi advindo do litoral em direção ao interior do continente, no sentido nordeste - sudoeste, correspondendo à característica de circulação dos ventos alísios da região. Conforme o IBAMA (2003) a corrente de vento mais atuante no PNLM é o alísio de nordeste, seguido do de sudeste. Corroborando com o que foi observado, Santos e Santos (2015) no seu estudo sobre o PNLM, afirmam que os ventos alísios, juntamente com as temperaturas e o regime pluviométrico, encontram um solo sedimentar e moldam um relevo suavemente ondulado coberto por campos de dunas móveis cujas configurações acompanham o sentido dos ventos.

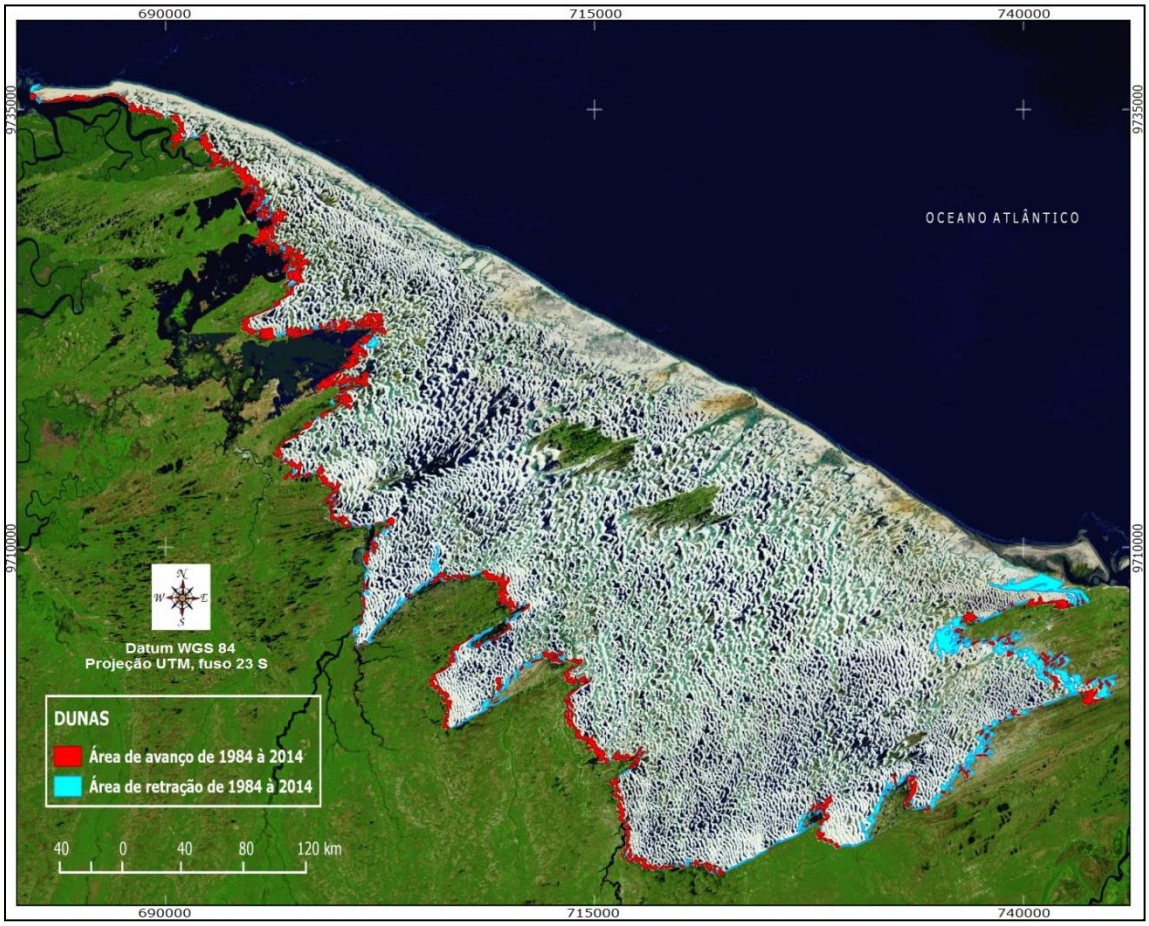

Figura 3: Imagem de 2014 e a representação das áreas que apresentaram avanço ou retração dunária em 31 anos.

Nos quatro pontos de observação foi verificado que houve o mesmo sentido de deslocamento das dunas como pode ser visualizados na Figura 4, que apresenta as linhas de vetores, representadas com cores distintas.

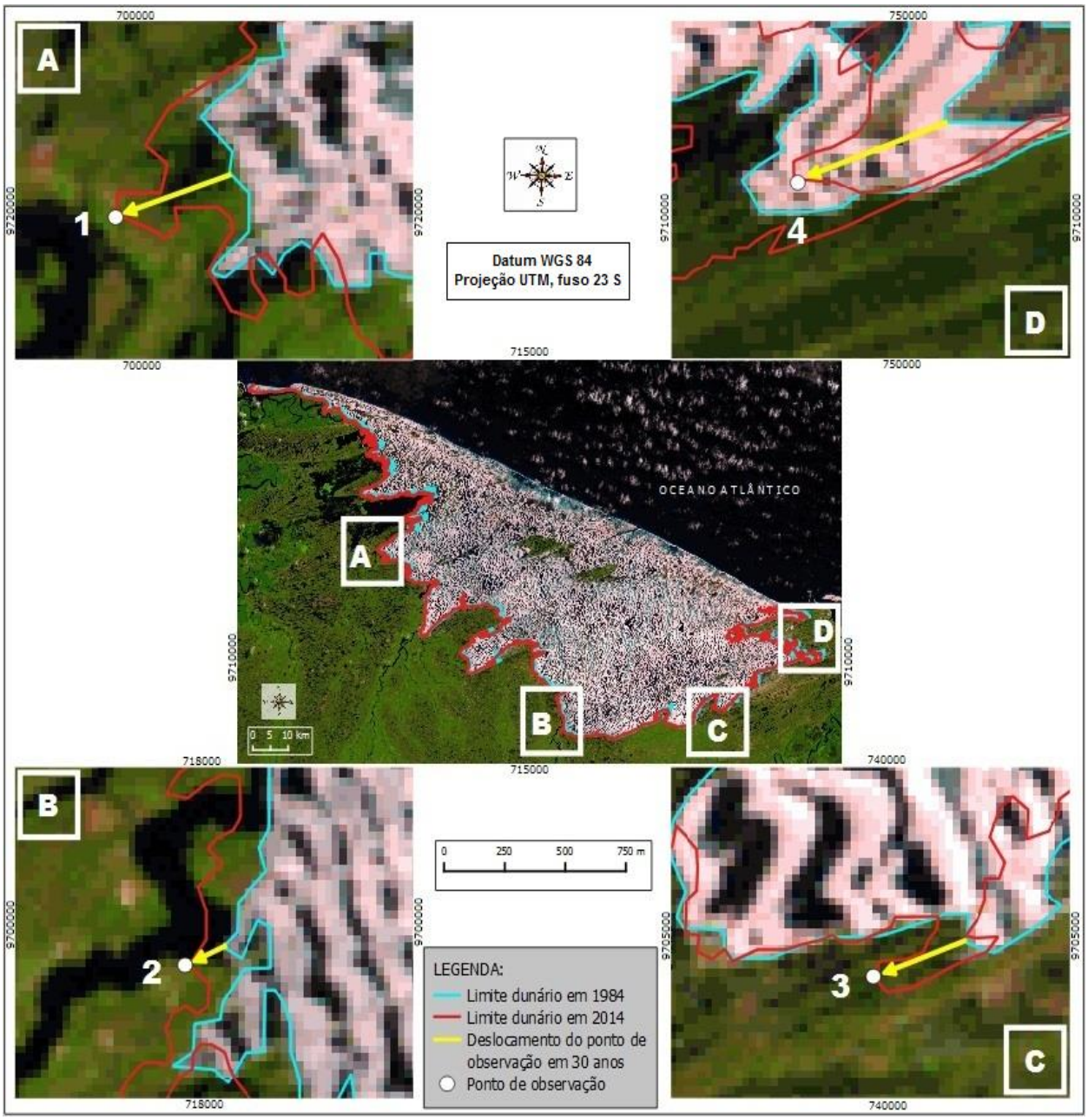

Figura 4: Imagem adquirida em 1984 e a representação vetorial do deslocamento dunário nos pontos de observações em 31 anos.

Foram feitas medições da variação linear do deslocamento de 4 pontos localizados sobre a linha vetorial do limite dunário em 2014 e a correspondente feição no ano de 1984. No ponto 1 observou-se um avanço dunário, com expansão de 487,3 m das dunas em direção à cidade de Santo Amaro. Verificou-se durante o trabalho de campo que esse avanço ainda não ocasiona transtornos significativos à população quanto a soterramento de casas. Trabalhos que estudam o avanço de dunas em direção às cidades são realizados com frequência para auxiliar no planejamento e prevenção de desastres às cidades, como em Meireles, Silva e Thiers (2006) que monitoraram o avanço das dunas em direção ao município de São Gonçalo do Amarante-CE, na qual as casas e as vias de acesso foram sistematicamente soterradas. Como também por Amirahmadi, Aliabadi e Biongh (2014) mensurando o avanço das dunas sobre as casas e as áreas agricultáveis da aldeia Darbahang, a sudoeste de Sabzevar no Irã, que

estavam prejudicando as atividades socioeconômicas da localidade.

No ponto 2 foi observada a menor variação entre os pontos monitorados, com avanço do sistema dunário de 160,6 m. Entende-se que esse pequeno avanço é devido a presença de um corpo hídrico volumoso, a lagoa da Esperança, que contribui para a redução da taxa de migração de areia. Meireles (2011) quando analisou a dinâmica do sistema dunário em Jericoacoara-CE, também percebeu que a sedimentação era reduzida próxima a corpos hídricos.

As dunas do ponto 3 apresentaram 408,7 m de avanço, na direção de áreas previamente ocupadas com vegetação de restinga, a qual ofereceu pouca resistência ao deslocamento dos grãos de areia. Esse mesmo comportamento foi constatado em Silva e Dourado (2012) ao monitorar o deslocamento das dunas do Peró, em Cabo Frio-RJ, comprovando que a presença de vegetação de menor porte, com características mais rasteiras, pouco inibe o deslocamento da frente de duna.

Já o ponto 4 apresentou 657,8 m de retração das dunas durante os 31 anos de observação. Entre os pontos observados, este é o que apresentou maior variação, por estar mais próximo ao litoral e apresentar menor número de obstáculos oferecidos pelo relevo. Amirahmadi, Aliabadi e Biongh (2014) em estudos sobre a evolução de dunas a sudoeste da cidade de Sabzevar no Irã,detectaram que o deslocamento dunário possui taxas mais elevadas quando existe pouco ou nenhum obstáculo que dificulte a circulação dos ventos, e Tomazelli et al. (2008) ao analisar os campos de dunas do litoral norte do Rio Grande do Sul, verificaram que os obstáculos topográficos naturais ou construídos podem reduzir a taxa de migração das dunas, dificultando a circulação do vento dominante sobre os corredores de alimentação, responsáveis pelo deslocamento dos sedimentos.

Apesar do total da área de avanço do sistema dunário ter sido maior que a área de recuo, foi na retração que o deslocamento morfológico teve mais expressividade, principalmente no ponto 4, pois as dunas desta porção estão na zona de entrada dos ventos alísios mais atuantes da região. Santos e Santos (2015) verificaram na sua análise que o setor sudeste do PNLM apresentou maior taxa de deslocamento das dunas, e também justificam esse padrão devido a menor distância em relação à área litorânea, a qual possui ventos mais fortes e constantes.

Análise temporal da variação dos valores de reflectância nos pontos de observações

A análise dos valores de reflectância de superfície dos pontos de observação em cada um dos 31 anos monitorados permitiu caracterizar o intervalo de valores que apresentaram os principais alvos analisados ao longo da série temporal. A vegetação na região do infravermelho próximo apresentou valores de reflectância da superfície entre 0,25 a 0,30. A vegetação de restinga, que de acordo com o IBAMA (2003), é o principal tipo de vegetação encontrada na área do parque, a qual é composta por comunidades herbáceas, esclerofilas arbustivas e/ou arbóreas. Normalmente a reflectância da vegetação apresenta valores mais elevados na região espectral do infravermelho próximo (Reeves; Anson; Landen, 1975). No entanto, a vegetação campestre com predominância de espécies mais rasteiras possui um comportamento espectral sazonal, em que periodicamente as partes aéreas ficam secas, o que provoca a redução nos valores da reflectância (Carvalho Júnior et al., 2008). Essas condições também foram encontradas por Jaccoberger (1989) nos ambientes dunários em Botsuana, na qual durante a estação seca, a vegetação rasteira apresentou baixa reflectância. As dunas apresentaram na região do infravermelho próximo um comportamento espectral com valores que variaram de 0,40 a 0,50 de reflectância de superfície. Jacobberger (1989) também encontrou valores similares de reflectância de superfície na área das dunas no Egito e em Mali, pois as áreas observadas apresentavam composições semelhantes de areia com solo quartzoso. Sabe-se que os solos mais arenosos tendem a ter maiores valores de reflectância no infravermelho próximo em comparação aos demais solos, devido sua constituição mineralógica, principalmente aqueles ricos em quartzo e com baixos teores de ferro (Madeira Netto, 1993; Resende et al.,2005). Os valores da reflectância inferiores a 0,2 estão associados à água, sendo similares aos valores normalmente observados para esse tipo de alvo (Jensen, 2009).

Na Figura 5 estão apresentados os valores de reflectância de superfície da banda do infravermelho próximo para os quatro pontos de observação em cada um dos 31 anos analisados. O ponto Santo Amaro apresentou valores crescentes de reflectância, indicando a

ter ocorrido uma mudança gradual da cobertura do solo, passando da vegetação para areia. Essa é a zona de saída no limite oeste do PNLM e é um ambiente de considerável soterramento por sedimentos eólicos proveniente das dunas (Castro, 2004; Santos, 2008). Na Lagoa da Esperança, o comportamento espectral se manteve regular nos anos estudados, indicando a não ocorrência de mudanças na cobertura do solo, que conforme já discutido na análise da Figura 4, sendo o próprio corpo hídrico a razão dessa não mudança observada. Na Lagoa Azul ocorreu um decréscimo dos valores de reflectância nos 31 anos de análise, com uma mudança brusca no ano de 2010, indicando que a área com inicial predomínio de dunas passou a ser ocupada por água. Próximo ao Atins foi observado maiores oscilações nos valores de reflectância, mais precisamente nos anos de 1985-1986, 1995-1996, 1998-1999. Essas alterações ocorrem em concomitância com os anos de influência de fenômenos como El Niño e La Niña, que podem ser observadas a partir da Tabela 4. O El Niño altera o padrão climático local ao favorecer o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical mais ao norte e por um maior intervalo de tempo, propiciando o aumento da estiagem pluviométrica na região (Carvalho; Maia; Dominguez, 2006). A ocorrência da La Niña aumenta a presença hídrica no ambiente dunário, pois segundo Carvalho, Maia e Dominguez (2006), o setor norte da região nordeste do Brasil em anos de La Niña apresenta chuvas acima da média local. A tendência é que os deslocamentos dunários nos Lençóis Maranhenses sejam maiores quando houver índices pluviométricos reduzidos, pois de acordo com Araujo, Sousa e Feitosa (2011), é no período seco que os ventos atuam de forma mais intensificada, em que o ambiente possui maior deficiência hídrica e assim o ar se mantém mais seco.

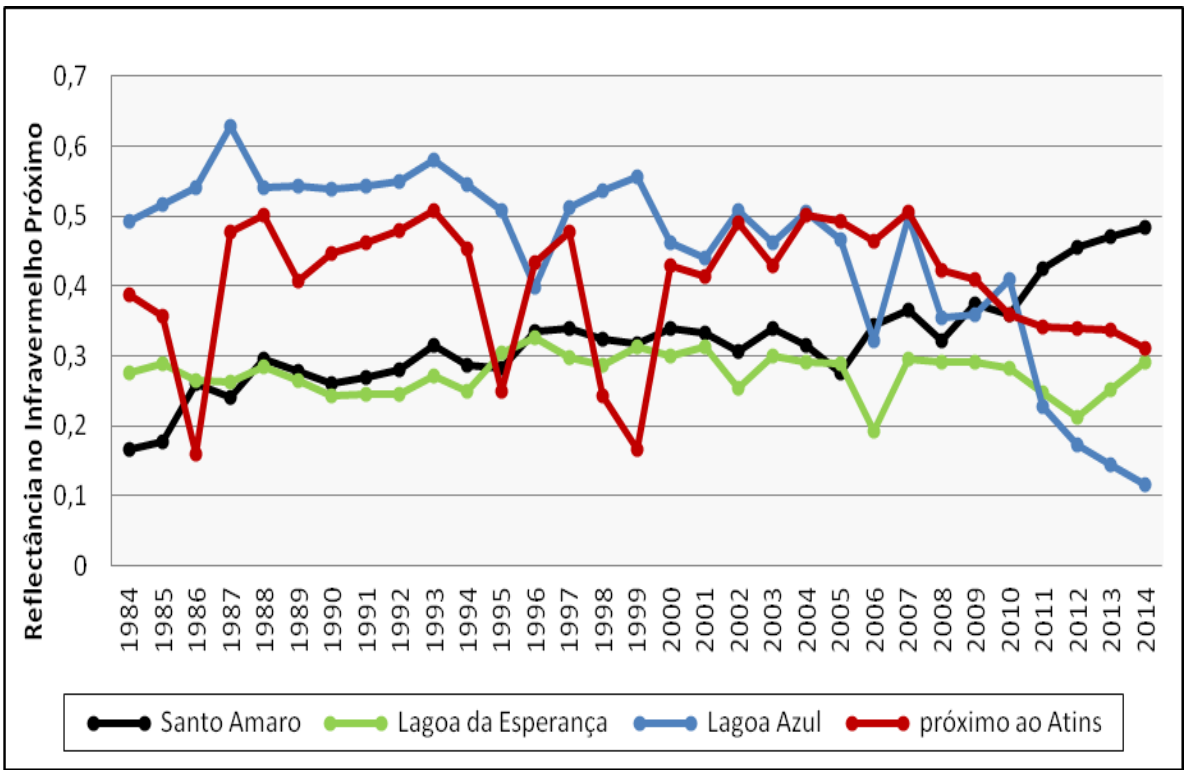

Figura 5: Variação multitemporal da reflectância na banda do infravermelho próximo entre 1984 e 2004 nos pontos de observações.

Tabela 4–Períodos de ocorrência de El Niño e La Niña e sua intensidade no período analisado.

EL NIÑO		LA NIÑA	
1982 – 1983	Forte	1983 - 1984	Fraco
1986 – 1988	Moderado	1984 - 1985	Fraco
1990 – 1993	Forte	1988 - 1989	Forte
1994 – 1995	Moderado	1995 - 1996	Fraco
1997 – 1998	Forte	1998 - 2001	Moderado
2002 – 2003	Moderado	2007 - 2008	Forte
2004 – 2005	Fraco	–	–
2006 – 2007	Fraco	–	–
2009 – 2010	Fraco	–	–

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE, 2015.

Estudo de caso: análise dos padrões de cobertura do solo na lagoa da Esperança

Na lagoa da Esperança foram comparados dois lugares próximos. O primeiro, denominado B1, é o local de base para a visitação turística na lagoa, na qual se estacionam os veículos automotores e tem como marco uma placa do órgão gestor do PNLM, que é o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Já o segundo local, denominado B2, se encontra distante aproximadamente 260 m no sentido norte da placa de referência do ponto inicial, sendo a localização dos pontos apresentadas na Figura 6 e a situação de cobertura do solo ilustrada na Figura 7.

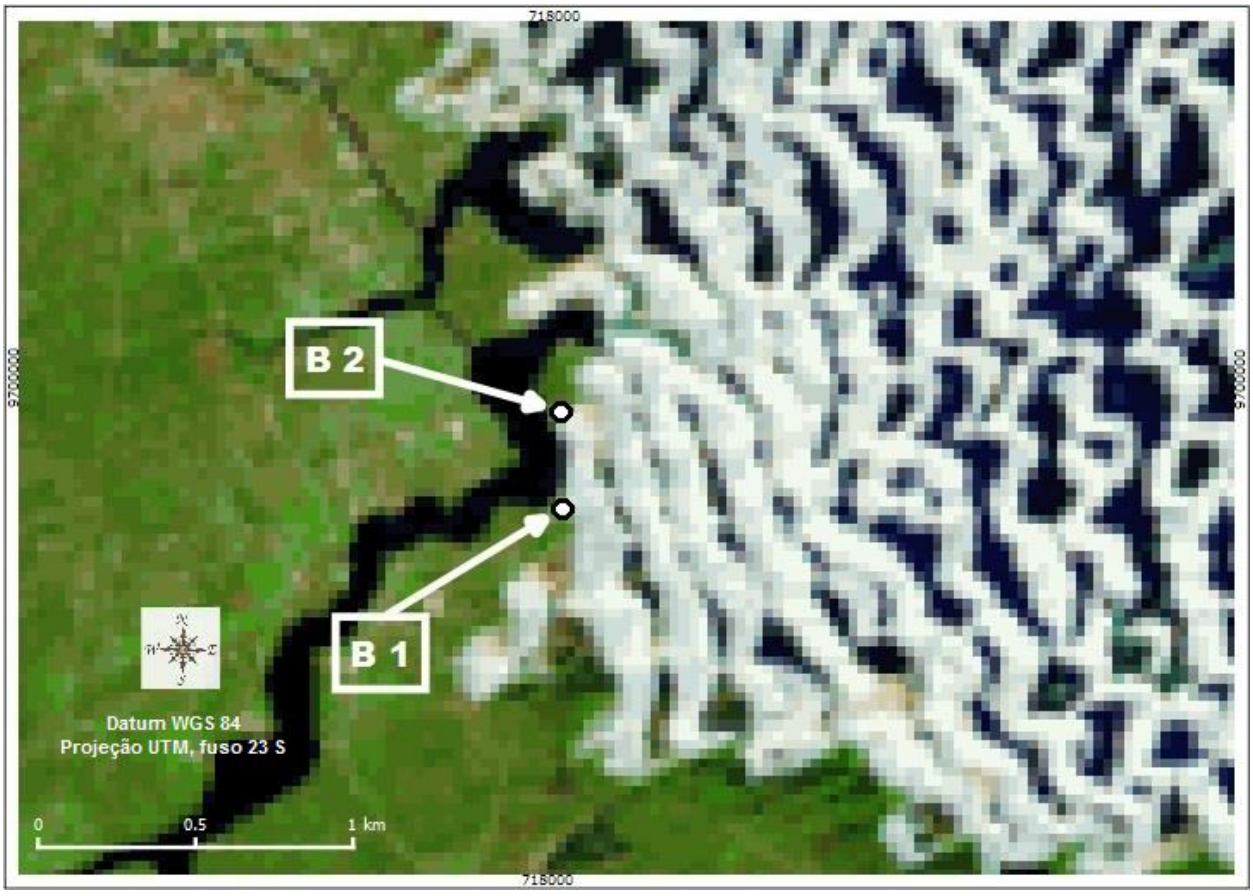

Figura 6: Posição dos pontos de observação B1 e B2 na lagoa da Esperança.

Figura 7: Perfil dos locais de observações B1 e B2 na lagoa da Esperança.

No gráfico da variação da reflectância da banda do infravermelho próximo apresentado na Figura 8 pode se observar que o ponto B1 apresentou uma regularidade quanto ao comportamento espectral, ocorrendo pequenas alterações nos anos observados, devido a preservação da vegetação durante este período. As causas para tanto, já previamente discutidas é a presença do corpo hídrico, o qual apresenta uma considerável recarga hídrica oriunda do Rio Negro. Para o ponto B2, ocorreu um acréscimo do valor de reflectância de forma gradativa no decorrer dos 31 anos de análise, em função do avanço das dunas em direção à lagoa da Esperança, soterrando parte da vegetação ciliar, como verificado durante o trabalho de campo e apresentado na Figura 7. Mesmo dificultadas pela presença dos vegetais, a tendência é que as dunas móveis do local B2 alcancem o ambiente lacustre, motivadas pela circulação dos ventos dominantes da região, os alísios de NE, que sopram na direção do corpo hídrico. Santos (2008) também constatou esta situação nas áreas próximas à lagoa da Esperança, em que quanto mais próximo da borda limite interna do parque, maior a taxa de migração das dunas, atrelado a uma série de fatores ambientais deste espaço. Esses diferentes padrões de estabilidade e de mudança da cobertura do solo em pontos muito próximos indicam o quão complexa é uma análise das mudanças internas dentro dos Lençóis Maranhenses. A distribuição espacial da vegetação, ora em conformidade com a direção de circulação dos ventos alísios de NE e ora não, influenciou para que o resultado fosse distinto nos pontos observados. Os vegetais são relevantes no processo de avanço ou recuo dos campos de dunas no PNLM, pois participam do processo diminuindo a taxa de migração dos sedimentos dunários, que conforme Santos e Santos (2015), contribuem ainda para que as taxas de migrações dunárias no PNLM possam variar de 4 m a 25 m ao ano.

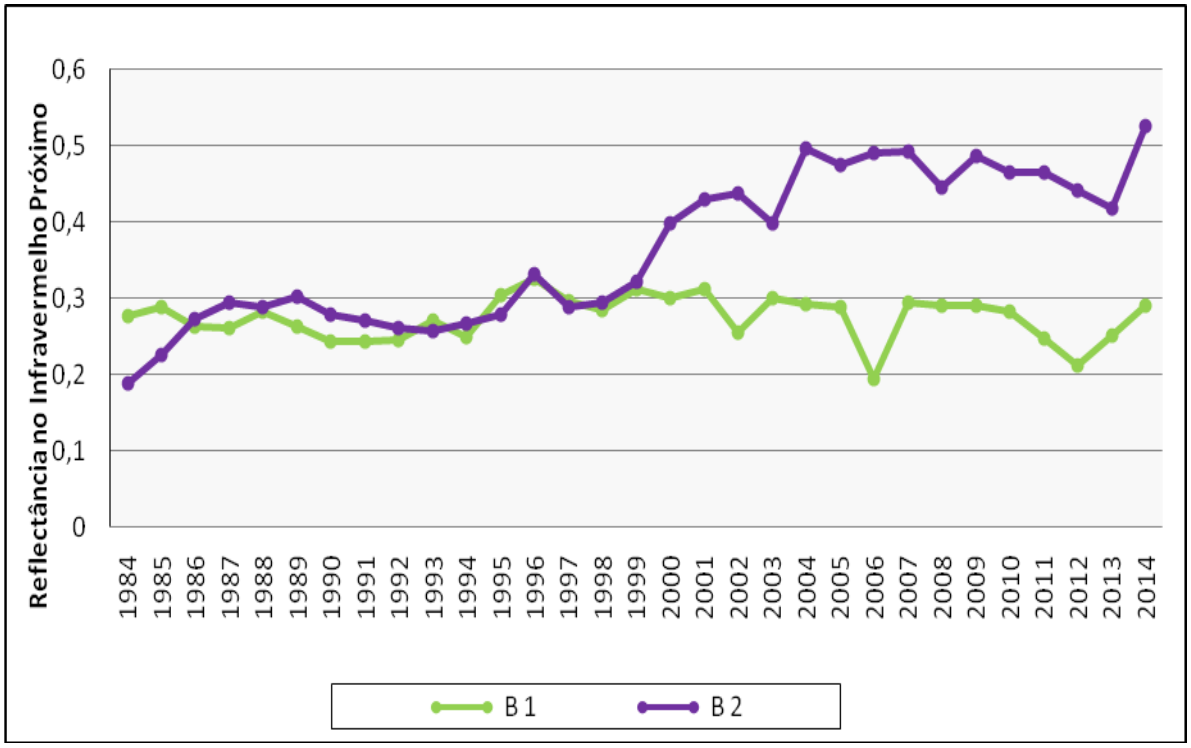

Figura 8: Comportamento espectral dos pontos de observações na lagoa da Esperança de 1984 a 2014.

Conclusão

A partir da análise das imagens de satélite selecionadas foi possível a visualização e a medição das áreas que apresentaram avanço e retração das dunas no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, entre os anos de 1984 a 2014.

A vetorização da borda interna do PNLM viabilizou a identificação do sentido de deslocamento das dunas, que de forma contínua, expandiu-se do litoral em direção ao interior do continente seguindo a circulação dos ventos alísios da região.

A variação temporal dos valores de refletância de superfície permitiu identificar, a partir de uma série de imagens de satélite, quando ocorreram as mudanças na cobertura do solo ao longo do tempo em diferentes pontos do PNLM durante os 31 anos analisados.

As metodologias utilizadas neste trabalho é comprovadamente uma relevante ferramenta para o monitoramento das dunas do PNLM, contribuindo dessa maneira para o planejamento e manejo do parque.

Agradecimentos

Este artigo está vinculado à dissertação para a obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a partir do apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Os autores agradecem também ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pelo importante apoio na logística da realização da pesquisa de campo.

Referências

Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R. 2002. SEBAL –Surface Energy Balance Algorithms for Land, Advanced training andusers manual. Idaho: Implementation1, 98.

Amaro, V. E., Gomes, L. R. S., Lima, F. G. F., Scudelari, A. C., Neves, C. F., Busman, D. V., Santos, A. L. S.2014. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil.Marine Geodesy 00, 01-25.

Amirahmadi, A., Aliabadi, K., Biongh, M.2014. Evaluation of changes in sand dunes in Southwest of Sabzevar by Satellite Images.International Journal of Scientific & Technology Research3, 120-12.

Araujo, T. D., Sousa, J. B. C. de, Feitosa, A. C. 2011. Potencial turístico do município de Santo Amaro do Maranhão - Estado do Maranhão - Brasil. Revista Geográfica da América Central, II Semestre, 1-14.

Aydda, A.; Algouti, A. 2014. Assessment of sand dunes movements rate in Atlantic Sahara desert using multitemporal landsat imagery and GIS technique. Multidimensão e Territórios de Risco**.** Guimarães, ed. Imprensa da Universidade de Coimbra.

BRASIL. Decreto nº 86.060, de 02 de junho de 1981. Cria, no Estado do Maranhão, o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, com os limites que especifica e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, v. 4, n. 213, 04 jun. 1981. Seção 1, p. 10374.

_____. Resolução CONAMA n° 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n. 90, 13 mai.2002. Seção 1, p. 69.

Carter, R. W. G. 1988. Coastal environments: An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines**.** Ed. Academic Press, London.

Carvalho, A. M., Maia, L. P., Dominguez, J. M. L,2006. Caracterização do processo de migração das dunas de Flexeiras, Baleia, Paracuru e Jericoacoara, costa noroeste do Ceará. Arquivos de Ciências do Mar1,44-52,.

Carvalho Júnior O. A., Coelho M. A. N., Martins E. S., Gomes R. A. T., Couto Júnior A. F., Oliveira S. N. & Santana O. A. 2008. Mapeamento da vegetação na Floresta Atlântica usando o classificador de árvore de decisão para integrar dados de sensoriamento remoto e modelo digital de terreno. Revista Brasileira de Geofísica, 26, 331-345.

Castro, J. W. A. 2004.Transporte eólico de sedimentos e migração de dunas sobre o promontório de Paracuru, litoral setentrional do nordeste brasileiro.Boletim do Museu Nacional 72,1-10.

CPTC/INPE. El Niño e La Niña.Disponível em: http://enos.cptec.inpe.br/, Acesso em: 23 abr. 2015.

Ehlers, M. 2007. Sensoriamento Remoto para usuários de SIG – Sistemas sensores e métodos: entre as exigências do usuário e a realidade. Sensoriamento Remoto e SIG Avançados. Org. Blaschke, T. e Kux, H. 2ª ed. Editora Oficina de Textos,São Paulo, pp. 19 - 38.

Goldsmith, V. 1978. Coastal dunes. Coastal sedimentary environments. In: Davis, R. A. (Editor). Springer - Verlag,New York, pp.171 -235.

Gonçalves, R. A., Lehugeur, L. G. O., Castro, J. W. A., Pedroto, A. E. S.2003. Classificação das Feições Eólicas dos Lençóis Maranhenses – Maranhão – Brasil. Mercator 9, 99-112.

Hugenholtz, C. H.; Levin, N.; Barchyn, T. E.; Baddock, M. C.2012. Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook.Earth-Science Reviews 111, 319-334.

IBAMA.2003. Plano de Manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses**.** Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis, São Luís, MA.

IBGE. 2002. Malha municipal do Estado do Maranhão. Resolução Nº 05 de 10 de outubro de 2002.

Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation**.** Academic Press, New York.

ITT Visual Information Solutions. 2009. Introduction to QUAC and FLAASH,in: Atmospheric Correction Module User's Guide ENVI 4.7. Ed. IDL Assistant, New York, pp 41.

Jacobberger, P. A. 1989. Reflectance characteristics and surface processes in stabilized dune environments. Remote Sensing of Environment28, 287-295.

Janke, J. R. 2002. An analysis of current stability of the dune fields at Great Sand Dunes National Monument using temporal TM imagery (1984-1998). Remote Sensing of Environment 83, 488-497.

Jensen, J. R. 2009. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução de J. C. N. Epiphanio. Parênteses,São José dos Campos, SP: pp598.

Levin, N., Ben-Dor, E., Karnieli, A., 2004. Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images.Remote Sensing of Environment 90, 190-209.

Levin, N, Tsoar, H., Maia, L. P., Claudino-Sales, V., Herrmann, H. 2008. Lagoas costeiras interdunares e branqueamento de dunas no Nordeste do Brasil. Mercator 7, 143-166.

Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. 1987. Remote sensing and image interpretation. 2ª Ed. Jonh Wiley & Sons,New York.

Madeira Netto, J. S. 1993. Etude quantitative des relations constituants min ralogiques reflectance diffuse des latosols brésiliens. Application àl'utilisation pédologique des données satellitairesTM 1. Ed. ORSTOM,Paris.

MARANHÃO. 2003. Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão. Fundação Sousândrade de Apoio e Desenvolvimento da Universidade Federal do Maranhão, Ed. IICA/ GEAGRO/LABOHIDRO. São Luiz.

Meireles, A. J. A. de. 2011. Geodinâmica dos campos de dunas móveis de Jericoacoara/CE - BR. Mercator10, 169-190.

Meireles, A. J. A.2014. Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais**.** Ed. Imprensa Universitária, Fortaleza.

Meireles, A. J. A., Silva, E. V., Thiers, P. R. L. 2006. Os campos de dunas móveis: fundamentos dinâmicos para um modelo integrado de planejamento e gestão da Zona Costeira. GEOUSP - Espaço e Tempo 20, 101 - 119.

Meneses, P. R. 2012. Princípios de sensoriamento remoto. in.: Meneses, P. R. e Almeida, T. Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**.** Brasília: UNB/CNPq 1, pp. 01-33.

Mohamed, I. N. L., Verstraeten, G.2012. Analyzing dune dynamics at the dune-field scale based on multi-temporal analysis of Landsat-TM images. Remote Sensing of Environment 119, 105-117.

Morain, S. A.1998. A Brief History of Remote Sensing Applications, with Emphasis on Landsat. in: People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science**.** D. Liverman, E. F. Moran, R. R. Rindfuss, and P. C. Stern, (Eds).Nacional Academy Press, Washington, D.C. pp 70-93.

Moreira, M. A. 2011. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4. ed. Viçosa: Ed. UFV.

NASA. The Landsat program. Disponível em: http://landsat.gsfc.nasa.gov/, Acesso em: 16 ago. 2014.

Novo, E. M. L. M. 2010. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**.**4 ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo.

Perkins, T., Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Berk, A., Bernstein, L.S., Lee, J., Fox, M. J. 2012 Speed and Accuracy Improvements in FLAASH Atmospheric Correction of Hyperspectral Imagery. SPIE: Optical Engineerin 51, 01 - 07.

Reeves, R. G., Anson, A., Landen, D. Manual 1975. of Remote Sensing.Virginia: American Society of Photogrammetry Falls Church2, 2144.

Resende, M., Curi, N., Ker, J. C., Rezende, S. B. 2005. Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações**.** Editora UFLA. Lavras.

Rocha, C. H. B. 2000. Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**.** Ed. do Autor. Juiz de Fora.

Santos, J. H. S. dos. 2008. Lençóis Maranhenses atuais e pretéritos: um tratamento espacial. Tese (Doutorado em Geografia).Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Santos, J. H. S., Santos, N. F. B. 2015. The Lençóis Maranhenses: A Paradise of Dunes and Ponds. in: Vieira, B. C., Salgado, A. A. R and Santos, L. J. C.. (Org.). Landscapes and Landforms of Brazil.Ed. Springer, New York. pp.79-90.

Shaw, G., Burke,H. 2003. Spectral Imaging for Remote Sensing. Lincoln Laboratory Journal14, 3-28.

Silva, A. S. da., Dourado, F. 2012. Análise histórica da migração das dunas do Peró, Cabo Frio-RJ. Geo UERJ 7, 437 - 458.

Slater, P. N. 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Ed.Addison-Wesley, New York.

Sparavinga, A. C. A. 2013. Study of moving sand dunes by means of satellite images. International Journal of Sciences 2, 32-42.

Tomazelli, L. J., Dillenburg, S. R., Barboza, E. G., & Rosa, M. L. C. C.2008. Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Pesquisas em Geociências 35, 47 - 55.

Trebossen, H., Deffontaines, B., Classeau, N., Kouame, J., Rudant, J. P. 2005. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. Comptes Rendus Geosciences 337, 1140 - 1153.

United States Geological Survey (USGS). Landsat missions, specifications of the bands and sensors**.**Disponível em: http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php, Acesso em: 14 dez. 2013.

_____.Landsat 8, instruments and data products. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/landsat8.php, Acesso em: 18 nov. 2014.

_____. Earth Explorer. Download Satellite images.Disponível em: http://earthexplorer.usgs.gov/, Acesso em: 20 fev. 2015.