

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
GEOGRAFIA LICENCIATURA

Gloria Yamileth Bolívar Durán

**Detecção de mudanças em um campo de dunas móveis utilizando
sensoriamento remoto no Município Aracati, Estado do Ceará**

Santa Maria, RS
2023

Gloria Yamileth Bolívar Durán

**Detecção de mudanças em um campo de dunas móveis utilizando
sensoriamento remoto no Município Aracati, Estado do Ceará**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Curso Geografia
Licenciatura, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do título de
LICENCIADA EM GEOGRAFIA.

Orientador: Prof. Dr. Romario Trentin

Santa Maria, RS
2023

Gloria Yamileth Bolívar Durán

Detecção de mudanças em um campo de dunas móveis utilizando sensoramento remoto no Município Aracati, Estado do Ceará

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso Geografia Licenciatura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de LICENCIADA EM GEOGRAFIA.

Aprovada em 13 de julho de 2023

Presidente/Orientador
Prof. Dr. Romario Trentin (UFSM)

Prof. Dra. Carina Petsch (UFSM)

Prof. Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

A Deus
Aos Estudantes
Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que é meu amigo que nunca falha, por sempre estar no meu lado todos os dias.

Agradeço a Anderson pelo apoio, carinho e amor durante toda a caminhada, sua família por estar sempre presente, a minha mãe por me apoiar em todas as coisas que faço.

Muito obrigada a professora Carina Petsch pela orientação durante o estágio, a professora Fabiana Bianchini e o professor Lucas Kegler pela oportunidade de aprender da sua experiência dentro da escola e por todos os ensinamentos durante o estágio nas escolas.

Aos alunos nas escolas onde fiz o estágio por me ensinarem sempre algo novo sobre as relações humanas.

Agradeço muito ao professor Romario Trentin pela paciência durante esta caminhada e suas valiosas observações, obrigada pela orientação e amizade.

Obrigada a Professora Adryane Gorayeb por ser a mentora do tema desenvolvido neste trabalho.

E meu agradecimento a todas as pessoas que sempre estiveram aí dando um abraço, uma mão, um carinho, um conforto sempre que precisei, a todos meu muito obrigada!

O homem se relaciona com uma sociedade cheia de espaço, mas não com a natureza. Porque não há dialética do homem com algo que não tem finalidade como a natureza.

(Milton Santos, 1988)

RESUMO

DETECÇÃO DE MUDANÇAS EM UM CAMPO DE DUNAS MÓVEIS UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO NO MUNICÍPIO ARACATI, ESTADO DO CEARÁ

AUTORA: Gloria Yamileth Bolívar Durán
ORIENTADOR: Prof. Dr. Romário Trentin

A planície costeira do Baixo Jaguaribe no Município de Aracati-CE é um espaço geográfico com potencialidade para a exploração de energia eólica, mas qualquer empreendimento realizado sobre a planície e o campo de dunas móveis pode afetar o equilíbrio da dinâmica costeira. A partir do ano 2008, foi construído um dos primeiros parques eólicos de grande porte no estado de Ceará, uma condição pioneira que trouxe além de produção de energia de uma fonte renovável como o vento alguns conflitos sócio-ambientais nas comunidades próximas e impactos locais sobre o campo de dunas móveis cujas alterações afetam a dinâmica das dunas e o transporte de material sedimentário. O objetivo deste trabalho foi identificar as mudanças no campo de dunas móveis na planície costeira do Baixo Jaguaribe entre os anos 2002 e 2013, intervalo de tempo que contempla o antes e depois da instalação do parque eólico, para verificar se houve alguma mudança no deslocamento das dunas depois da instalação do parque eólico. Na análise multitemporal foram utilizadas imagens do sensor SPOT 5 em datas relacionadas com o período seco. Os métodos aplicados para a detecção de mudanças foram a análise de mistura espectral (AME) e a operação aritmética de bandas de diferença entre imagens. Foi realizada a comparação temporal entre os componentes AME correspondentes ao campo de dunas e as medições lineares de deslocamento entre dunas em 21 locais escolhidos, identificando locais de fixação de dunas, redução de deslocamento de dunas e locais com avanço normal. Foi observada uma queda do deslocamento das dunas a partir do ano 2011 e alguns pontos onde a estrada funciona como barreira reduzindo o deslocamento da duna e/ou ações antrópicas como fixação com palha de coqueiro contribui com o processo de fixação da duna. Estas informações foram validadas utilizando imagens QuickBird e o desenho das frentes de dunas, confirmando que os valores de deslocamento se encontram dentro das estimativas do método aplicado. A implementação de parques eólicos sobre o campo de duna móveis, se comporta como uma barreira que causa mudanças na morfologia das dunas e sua dinâmica de deslocamento natural. A utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e imagens de maior resolução espacial ajudam a avaliar os impactos e recomendar locais alternativos, para um melhor planejamento do espaço geográfico.

Palavras-chave: Detecção de Mudanças, Sensoriamento Remoto, Dunas, Mistura Espectral, Análise Multitemporal

ABSTRACT

CHANGE DETECTION IN A MOBILE DUNE FIELD USING REMOTE SENSING IN MUNICIPALITY OF ARACATI, CEARÁ STATE

AUTHOR: Gloria Yamileth Bolívar Durán

ADVISOR: Prof. Dr. Romário Trentin

The coastal plain of Baixo Jaguaribe in the Municipality of Aracati – CE is a geographic space with potential for the exploitation of wind energy, but any undertaking carried out on the plain and the field of mobile dunes can affect the balance of the coastal dynamics. As of 2008, one of the first large wind farms was built in the state of Ceará, a pioneering condition that brought, in addition to producing energy from a renewable source such as wind, some socio-environmental conflicts in nearby communities and local impacts on the mobile dune field whose alterations affect dune dynamics and the transport of sedimentary material. The objective of this work was to identify the changes in the mobile dune field in the coastal plain of Baixo Jaguaribe between 2002 and 2013, a time interval that includes before and after the installation of the wind farm, to verify if there was any change in the displacement dunes after the installation of the wind farm. In the multitemporal analysis, images from the SPOT 5 sensor were used on dates related to the dry period. The methods applied for the detection of changes were the spectral mixture analysis (AME) and difference bands math between images. A temporal comparison was made between the AME dune components and the linear measurements of displacement between dunes in 21 chosen locations, identifying locations of dune fixation, reduction of dune displacement and locations with normal advance. A drop in dune displacement was observed from 2011 and some points where the road works as a barrier reducing the displacement of the dune and/or anthropic actions such as fixation with coconut palm straw contributes to the process of dune fixation. This information was validated using QuickBird images and the drawing of dune fronts, confirming that the displacement values are within the estimates of the applied method. The implementation of wind farms on the mobile dune field, behaves as a barrier that causes changes in the morphology of the dunes and their natural displacement dynamics. The use of remote sensing tools and images with high spatial resolution help to assess impacts and recommend alternative locations, in favor of better planning of geographic space.

Keywords: Change Detection, Remote Sensing, Dunes, Spectral Mixing, Multitemporal Analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa Imagem área de estudo	17
Figura 2 - Precipitação média anual no município de Aracati – CE entre 1984 – 2018.	20
Figura 3. Tipos de Dunas	24
Figura 4. Dunas Transversais	24
Figura 5. Dunas Barcanas.....	25
Figura 6. Dunas Barcanoides	26
Figura 7. Dunas Fixas	26
Figura 8. Dunas Longitudinais.....	27
Figura 9- Esquema Metodológico.....	48
Figura 10. Duna Transversal encontrada no campo de dunas móveis	49
Figura 11. Dunas Barcanoides no campo de dunas móveis	50
Figura 12- Localização dos pontos de observação escolhidos para obter valores do deslocamento das dunas em Aracati – CE. Imagem SPOT R4G3B2, 02-09-2013. ...	51
Figura 13. Vista próxima ao ponto 21 desde o campo de dunas para a planície fluvio-marinha e as piscinas de carcinicultura.....	53
Figura 14. Aerogeradores próximos a praia e areia nas estradas de acesso	54
Figura 15. Trabalhos de fixação de dunas com material britado e palha de coqueiro	54
Figura 16. Remoção de areia das dunas na estrada de acesso ao parque eólico....	55
Figura 17- Processo de fixação artificial de dunas com o método AME.....	55
Figura 18. Ponto 7: Local de acesso ao parque eólico.....	56
Figura 19- Valores de deslocamento das dunas entre 2002 e 2013 por cada ponto de observação.....	57
Figura 20- Visualização das mudanças nas dunas em Aracati – CE. Alguns exemplos dos maiores deslocamentos entre 2002 e 2013 com imagens SPOT 5.....	59
Figura 21 - Posicionamento das frentes de dunas entre os anos de 2003 e 2009....	60
Figura 22- Ponto de validação – Ponto 11.	61
Figura 23- Ponto de validação – Ponto 7.	62
Figura 24- Ponto de validação – Ponto 18.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de deslocamento das dunas entre 2002 e 2013	52
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Período de ocorrência de El Niño e La Niña, intensidade do fenômeno e anos de seca no Ceará.	20
Quadro 2. Características do Satélite SPOT	39
Quadro 3. Características do satélite QuickBird.....	40
Quadro 4. Imagens Disponíveis para Aracati – CE.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1	Ambientes eólicos: campo de dunas.....	22
3.2	Sensoriamento remoto e estudos sobre Dunas	27
3.3	Análise linear de mistura espectral.....	29
3.4	Aritmética de Bandas	33
3.5	Considerações sobre detecção de mudanças	33
3.6	Energia eólica no Ceará.....	35
3.7	Conceitos básicos em Sensoriamento Remoto.....	36
3.8	Sensores passivos de alta resolução espacial.....	37
3.8.1	SPOT.....	37
3.8.2	QuickBird	38
3.9	Grandezas radiométricas	40
3.10	Pre-processamento das imagens.....	41
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	Materiais.....	43
4.2	Métodos	44
4.2.1	Correção Geométrica	44
4.2.2	Correção Radiométrica.....	45
4.2.3	Trabalho de campo.....	46
4.2.4	Métodos de detecção de mudanças	47
4.2.4.1	Diferença entre imagens.....	47
4.2.4.1	Análise de Mistura Espectral	47
5	RESULTADOS	49
6	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A planície costeira é um espaço geográfico com características próprias, com elementos tais como faixa praial, campo de dunas móveis, dunas fixas e paleodunas, terraços marinhos, espelhos d'água lagunares e lacustres e planícies fluviomarinhas com manguezais, canais de rios, eventuais pontas rochosas e falésias estão integrados em diferentes escalas e níveis de complexidade, interligados e associados a um sistema hierárquico, desta forma caracteriza um geossistema (CHRISTOPHERSON, 2012).

O desenvolvimento econômico nas regiões litorâneas do Estado do Ceará tais como a Foz do Rio Jaguaribe tem causado conversões e/ou modificações nesta planície litorânea, que embora apresenta grandes potencialidades para atividades turísticas e econômicas como a carcinicultura e exploração da energia eólica, possui uma vulnerabilidade ambiental que deve ser considerada para evitar alterar o equilíbrio da dinâmica costeira (SOUZA, 2005).

Considerando-se a planície costeira como um geossistema, todas as mudanças sobre a planície e no campo de dunas afetam o equilíbrio da dinâmica costeira que depende da manutenção do aporte de material na linha de costa. O material sedimentar identificado como fontes primárias são oriundas do sistema de drenagem de terras interiores, terras firmes e afloramentos de depósitos terrestres ao largo, enquanto as fontes secundárias, são aquelas criadas ao longo do tempo pelos sedimentos oriundos das fontes primárias como as praias, dunas e depósitos do largo (MORAIS, 2000).

No contexto do desenvolvimento em zonas costeiras, a planície costeira do Baixo Jaguaribe no Município de Aracati – CE, se encaixa nas afirmações da grande maioria de estudos e levantamentos que apontam o litoral do nordeste brasileiro como a região que dispõe das melhores condições para a produção de energia eólica. Conforme dados publicados no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), do Panorama do Potencial Eólico no Brasil (FEITOSA et al., 2003) e do Atlas do Potencial Eólico do Ceará (SEINFRA, 2004), a planície litorânea do Ceará é uma das regiões com maior potencial natural pela posição geográfica, o regime de ventos constantes e a existência de relevo favorável ao desenvolvimento desta atividade.

Com a crise energética do ano 2001, surge a resolução n. 279, de 27 de julho (BRASIL, 2001) que visou propor e implementar medidas de natureza emergencial que incrementaram a oferta de energia elétrica no país. Na intenção de resolver o problema energético de modo ágil, rápido e em nome da sustentabilidade, as usinas eólicas e outras fontes alternativas de energia foram considerados empreendimentos com baixo potencial de impacto ambiental, reduzindo os requisitos de licenciamento ao Relatório Ambiental Simplificado (RAS) (GORAYEB E BRANNSTROM, 2019).

A partir do ano de 2008, o campo de dunas móveis na faixa litorânea do Estado do Ceará, se tornou área de construção de parques eólicos para geração de energia elétrica utilizando o discurso de energia limpa. No campo de dunas móveis em Aracati – CE foi instalado um dos primeiros parques eólicos de grande porte e importância no estado do Ceará, em uma área próxima a comunidades tradicionais, ação que mostrou diversos problemas sócio-ambientais em nome de uma energia “limpa” a partir de um recurso renovável como o vento.

Essa condição pioneira desses parques, tem uma grande significância não só em termos de extensão e produção de energia, também pelos conflitos sociais e territoriais que foram gerados nas comunidades tradicionais próximas. Nas proximidades da área de estudo no município de Aracati – CE, encontra-se a comunidade de Cumbe, onde a estrada de acesso ao parque eólico foi construída considerando o caminho de acesso dos pescadores para o mar para pescar. Em ambos casos houve conflitos entre as comunidades e a empresa eólica pela alteração dos espaços comunitários, restrição de entrada e saída na praia, destruição de sítios arqueológicos, as relações afetivas com as dunas, lagoas interdunares e o mar e imposição de um projeto onde a população está envolvida (MEIRELES ET AL., 2013; MENDES, 2016; CHAVES ET AL, 2017).

Meireles et al. (2013) e Meireles (2016) apontam alguns impactos locais sobre os campos de dunas na Praia de Xavier (no município Camocim), onde foi instalado outro grande parque eólico, que se repetiram em Aracati – CE: 1) remoção da vegetação das dunas fixas para construção de estradas de acesso e operação de equipamentos; 2) remoção de dunas móveis e fixas, para nivelção e compactação do solo nas áreas de instalação das turbinas; 3) impactos nos sistemas fluvio-lacustres; 4) aterramento de lagoas interdunares

para construção de vias de acesso aos geradores; 5) impermeabilização e compactação de solos para construção de estradas, canteiros de obras e áreas de armazenamento de materiais; 6) retenção artificial das dunas móveis para impedir possíveis migrações que provoquem erosão nas áreas onde foi construído o parque eólico.

A instalação dos parques eólicos causa mudanças visíveis sobre o terreno, sendo um tipo de empreendimento que produz alterações que podem ser observadas, monitoradas e mapeadas utilizando técnicas de sensoriamento remoto, sendo possível compreender e avaliar as mudanças na dinâmica das dunas. Neste quesito, Durán (2020) fez um trabalho prévio sobre detecção de mudanças de uso e cobertura da terra aplicado na área de estudo utilizando dados multitemporais de sensores ativos e passivos, para observar as alterações no campo de dunas antes e depois da implantação dos parques eólicos e se a construção destes tem algum efeito na dinâmica desta área.

Naquele momento a aplicação do modelo Análise Linear de Mistura Espectral com imagens Landsat para avaliar o deslocamento das dunas em Aracati – CE proporcionou resultados intermediários, destacando que a resolução espacial impedia de observar deslocamentos inferiores a 30 m, sugerindo que trabalhar com imagens de alta resolução espacial pode proporcionar melhores resultados. Entendendo que a construção dos parques eólicos funciona como uma barreira que reduz o deslocamento das dunas, aspecto que não ficou muito evidente com o material utilizado, mas que nos trabalhos de campo e os relatos dos moradores das comunidades aparecia como um dado a ser verificado.

Alguns trabalhos foram realizados utilizando a análise de mistura espectral para monitoramento, detecção de movimento, direção, mudanças topográficas, tal é o caso de Blount et al (1990), Smith et al (1990a), Smith et al (1990b), Okina et al (2001), Collado et al (2002), Pan e Li (2013), Ji et al (2017), Ray et al (2019) e Dashti et al (2019). A mistura espectral refere-se ao fato de que cada pixel possui taxas de resposta espectral que podem ser separadas (SHIMABUKURO e PONZONI, 2017). As características espectrais altamente reflexivas única da areia das dunas ativas fazem com que pareça mais brilhante do que as dunas inativas.

Essa diferença de reflectância é melhor identificada com a análise de mistura espectral, pois o método separa as contribuições espectrais dos componentes intrínsecos da cena de sombras e outros efeitos de iluminação, tornando-o particularmente útil em áreas desérticas onde as proporções de vegetação e solo podem variar significativamente em distâncias curtas (RAY et al, 2019; SMITH et al, 1990b), e as mudanças de reflectância podem estar relacionadas com a dinâmica das dunas, evidenciando o deslocamento das dunas (COLLADO et al, 2002).

Neste sentido, considerando as condições naturais existentes na planície costeira do Baixo Jaguaribe, os impactos ambientais e sociais relatados nesta área onde foi instalado o parque eólico, surge o seguinte problema de pesquisa:

A presença de geradores de energia eólica causou alguma mudança no padrão de deslocamento nos campos de dunas?

Objetivo Geral

Identificar mudanças no campo de dunas móveis da planície costeira do Baixo Jaguaribe entre 2002 e 2013 e sua relação com a instalação de parques eólicos.

Objetivos Específicos

- Aplicar técnicas de detecção de mudanças utilizando imagens do sensor SPOT 5 considerando sua capacidade de identificar deslocamentos no campo de dunas;
- Elaborar uma série multitemporal de imagens que mostre a evolução do deslocamento das dunas no Baixo Jaguaribe;
- Verificar se houve mudança no deslocamento das dunas depois da instalação do parque eólico.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O campo de dunas na planície costeira do baixo Jaguaribe, está localizado no município de Aracati, estado do Ceará, cerca de 150km da cidade de Fortaleza, no litoral leste entre a foz do rio Jaguaribe e o litoral que inclui as praias de Cumbe e Canoa Quebrada, em uma área conhecida como a Costa do Sol Nascente. A Figura 1 mostra o mapa de localização da área de estudo.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXACTAS
GEOGRAFIA LICENCIATURA

UFSM

Mapa 1 Mapa Imagem da área de estudo Aracati

Convenções

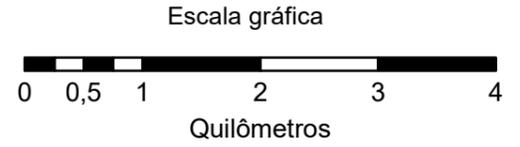
- Limite da área de estudo
- Limite municipal
- Aerogeradores
- Povoados

Sistema Hídrico

- Cursos d'água perenes
- Cursos d'água intermitentes

Sistema Viário

- Estrada pavimentada
- Estrada sem pavimentação
- Acesso aos aerogeradores



Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, Fuso 24 S

Fonte: Malha municipal digital IBGE, 2015. Imagem Landsat 8 OLI. Path/Row: 216/063. RGB: 4-5-3. Data 22-08-2017. USGS 2017. Folha: S05 W038, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Ano 2000. 1 arc segundo. USGS, 2016. Base Cartográfica de infraestrutura hídrica do Ceará - COGERH, 2015. Ortofotos a escala 1:2.000 SEMACE, 2016.

Elaboração: Gloria Durán

A área de estudo, corresponde a um campo de dunas móveis que ocupa 38 km², no município de Aracati – CE, na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, mais especificamente na planície flúvio-marinha e foz do rio Jaguaribe. Inclui a Área de Proteção Ambiental (APA) de Canoa Quebrada, criada na Lei nº 40/98 de 20 de março de 1998, que segundo a SEMACE (2010), é uma unidade de conservação que pretende regular a exploração e ocupação de uma região que inclui as mais variadas paisagens de rio, manguezal, dunas, praias, picos e falésias.

A zona costeira do Ceará encontra-se sob influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), formada pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul. Este processo causa que os ventos na região nordeste do Brasil possuam uma direção predominante leste-sudeste e as chuvas da região norte do Nordeste brasileiro sejam influenciadas pelas frentes frias, entre os meses de novembro e janeiro (OLIVEIRA, 2009).

O vento exerce um papel fundamental no litoral do Nordeste, como fator que favorece a acumulação de material sedimentário tanto em forma de dunas como nas praias arenosas ao longo da costa do Ceará. No período chuvoso, sendo os meses de março e abril onde ocorrem os maiores índices de precipitação, predominam ventos de SE (120°-150°) ao longo do dia, passando a SSE-S (150°-180°+) durante a noite (MUEHE, 2006).

Entre maio e agosto se reduz a incidência de precipitação, sendo este um período de transição, onde o ciclo térmico diurno terra-oceano passa a alternar brisas marinhas e terrestres, resultando em ventos de ENE-E (60°-90°) durante o dia, e E-SE (90°-150°) à noite. Na época seca entre setembro e novembro, tanto os ventos alísios quanto as brisas marinhas se intensificam, com direção predominante variando de E a SE, com predomínio dos ventos alísios de E, embora os ventos mais intensos sejam interanualmente variáveis (MUEHE, 2006).

Vale destacar que as condições meteorológicas características da ZCIT sofrem influências durante os anos de atuação do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), que segundo Fernandez & Muehe (2006), refere-se à anomalia da temperatura das águas superficiais do centro-oeste do Oceano Pacífico, predominantemente na região equatorial.

No Brasil, os efeitos desse fenômeno derivam em chuvas mais pronunciadas nas regiões Sul e Sudeste, enquanto no Nordeste, ocorre a redução das chuvas e prolongamento da estiagem (ALVES & RAPELLI, 1992). Com o fenômeno La Niña, acontece o inverso, a precipitação aumenta no Nordeste e diminui no Centro-Sul do país.

De acordo a Freitas (1997), existe uma possível relação entre o fenômeno do El Niño e o comportamento pluviométrico no Nordeste do Brasil. Considerando os anos de seca, foi possível verificar que de modo geral ocorrem anos de secas após anos de ocorrência do El Niño, apresentado-se alternância entre períodos úmidos e secos, isto aconteceu nos anos 1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1971, 1982 e 1986. Sem embargo, nem sempre o ano seguinte a um ano El Niño corresponde a um ano seco, há anos secos que não seguiram anos de El Niño, como ocorreu em 1977 e 1979.

O quadro 1, mostra os anos de ocorrência de El Niño e La Niña segundo Null (2018) e são ressaltados em azul os anos secos anuais ou plurianuais de Carvalho (2012) e Banco Mundial (2015).

De acordo com a tabela, a intensidade dos fenômenos El Niño e La Niña, não são ponderadas por Freitas (1997), que apenas menciona só um destes fenômenos. A relação entre El Niño e os períodos de déficit pluviométrico parece ser mais notória nos anos que ocorreram intensos episódios do fenômeno ENOS no Pacífico Equatorial, como ocorreu em 1983, 1993 e 1998 (NOBRE, 2012).

O Estado do Ceará entre 2010 e 2016 sofreu uma seca plurianual, que já foi estimado como o período mais severo de seca dos últimos 100 anos pelo Banco Mundial (2015), Magalhães (2016), Funceme (2016), Cortez et al (2017) e Gondim et al (2017), sendo um fenômeno que se estendeu até o ano 2017, sendo que o fenômeno das secas, é recorrente em regiões semiáridas, tais como o caso do nordeste brasileiro.

As chuvas no Ceará apresentam alta variabilidade espacial e temporal ao longo do ano. Em termos anuais, mostra uma alta sazonalidade, com um período úmido de janeiro a julho e um período seco de agosto a dezembro onde quase não chove. A figura 2 mostra a média anual do município de Aracati – CE. Em termos de temperatura média mensal, o regime térmico é relativamente estável, pouco ameno e de reduzida amplitude, tendo seus valores máximos de 28,1°C (em janeiro) e mínimos com 26°C (em julho).

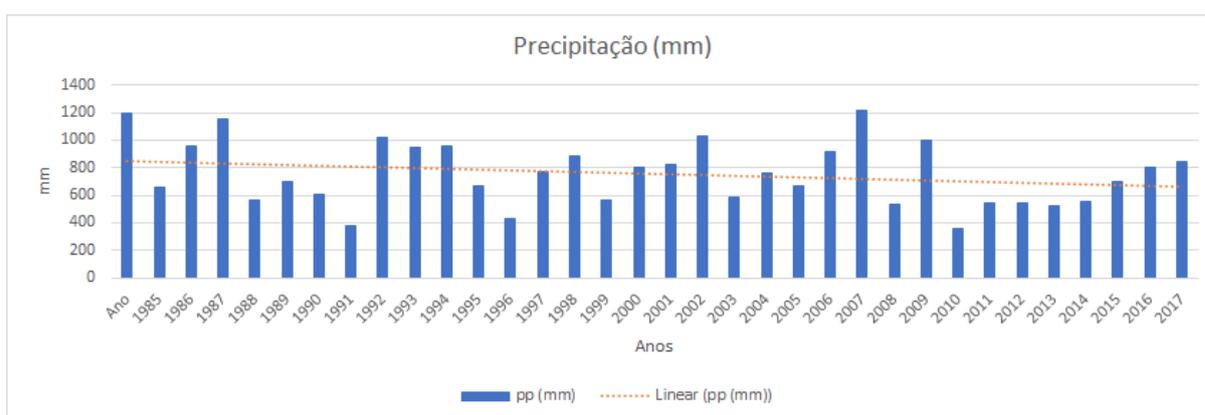
Quadro 1- Período de ocorrência de El Niño e La Niña, intensidade do fenômeno e anos de seca no Ceará.

El Niño				La Niña		
Fraco	Moderado	Forte	Muito Forte	Fraco	Moderado	Forte
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
				2017-18		

*anos marcados em azul correspondem aos anos de seca no Ceará.

Fonte: Null (2018). Banco Mundial (2015), Cortez et al (2017).

Figura 2 - Precipitação média anual no município de Aracati – CE entre 1984 – 2018.



Fonte: Funceme, 2020.

Esta variabilidade é visível na extensão das lagoas interdunais, já que o aporte de água vem da chuva e o tamanho e nível de água destas lagoas depois do período de chuva, é variável de acordo com a quantidade de precipitação se proporcionou uma recarga importante ou insuficiente do aquífero localizado abaixo do campo de dunas móveis ou se houve alguma alteração nos fluxos subterrâneos.

De acordo a Levin et al (2009), a relação entre as variáveis precipitação e vento ocorre de forma inversamente proporcional, sendo que durante a estação das chuvas, altos níveis de precipitação reduzem o transporte eólico e, conseqüentemente, à mobilidade das dunas. A formação das lagoas interdunais favorece o crescimento da vegetação na base da duna devido ao aumento da umidade da areia, à queda da intensidade do vento na base das dunas, proporcionando uma estabilidade que resulta em uma fixação temporária. Já durante a estação seca, a intensidade do vento aumenta, a umidade da areia diminui, se reduz o crescimento de vegetação na base da duna e, conseqüentemente, o vento transporta sedimentos de forma mais eficiente, resultando na migração das dunas (LEVIN et al, 2009).

A área de estudo está constituída predominantemente pelo material sedimentário terciário da Formação Barreiras, que parcialmente trabalhados no Pleistoceno e no Holoceno originaram os Tabuleiros Costeiros e os campos de dunas. (PEDROSA, 2016). Em Canoa Quebrada as falésias são testemunhos de Formação Barreiras (MORAIS et al, 2002).

No trabalho de Pedrosa (2016) e Durán (2020), destacam algumas características das dunas encontradas na área de estudo, em Aracati – CE, sendo predominantes as dunas longitudinais, onde está localizado o parque eólico; já próximo à localidade de Cumbe, dunas barcanóides expressivas ao sul do campo de dunas, próximo às localidades Beirada e Canavieira, assim como acumulações de areia livre sem forma definida chamadas lençóis de areias, identificadas próximo ao campo de dunas móveis. Não foram observadas dunas barcanas

A baixa concentração de dunas fixas ao redor do campo de dunas móveis em Aracati – CE, provavelmente esteja associado à permanente disponibilidade de areias a sotamar, face à erosão produzida pelas ondas nas falésias que

existem a barlavento do setor de dunas, na Praia de Canoa Quebrada, tal como menciona Pedrosa (2016).

Existem algumas dunas próximas a localidade do Cumbe que estão sendo fixadas de forma artificial, com folhas de palma, devido a que o avanço natural em direção ao continente estaria afetando (soterrando) alguns locais onde se desenvolve a atividade de carcinicultura.

Em Aracati – CE os campos de dunas atuam como indutores de corredores ecológicos entre a mata de tabuleiro, bosque de mangue e vegetação de restinga (ecossistemas localmente associados aos terraços marinhos, superfícies de deflação eólica e zona de berma).

Neste contexto destacam a comunidade de pescadores e quilombolas de Cumbe, Canoa Quebrada como uma praia turística mundialmente conhecida, o desenvolvimento da carcinicultura na planície flúvio-marinha do rio Jaguaribe com um crescimento acelerado e o parque eólico com 67 aerogeradores, construído no campo de dunas móveis na APA de Canoa Quebrada, onde se evidenciam mudanças tais como soterramento de lagoas interdunais e fixação de dunas como consequência da construção do parque eólico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Ambientes eólicos: campo de dunas

As ações eólicas geralmente estão associadas a ambientes morfogenéticos que não podem qualificar-se como próprios, este é o caso do litoral, certas planícies aluviais proglaciares, zonas distais de leques aluviais e lagoas efêmeras em zonas semi-áridas. Nestes casos os processos eólicos estão limitados a remobilizações gerando formas tais como dunas (PEDRAZA, 1996).

As dunas como uma forma de acumulação arenosa eólica, mostram a variabilidade do material fonte constituinte, cuja origem pode proceder de rochas alteradas, leitos de rios desérticos, terraços aluviais, superfícies de acumulação, praias, desembocaduras de rios, depósitos fluviais, litorais e lacustres. Com o descenso do nível do mar, algumas superfícies submarinas ao ficarem expostas,

foram submetidas à ação eólica, constituindo assim fonte de material (GUTIERREZ, 2001).

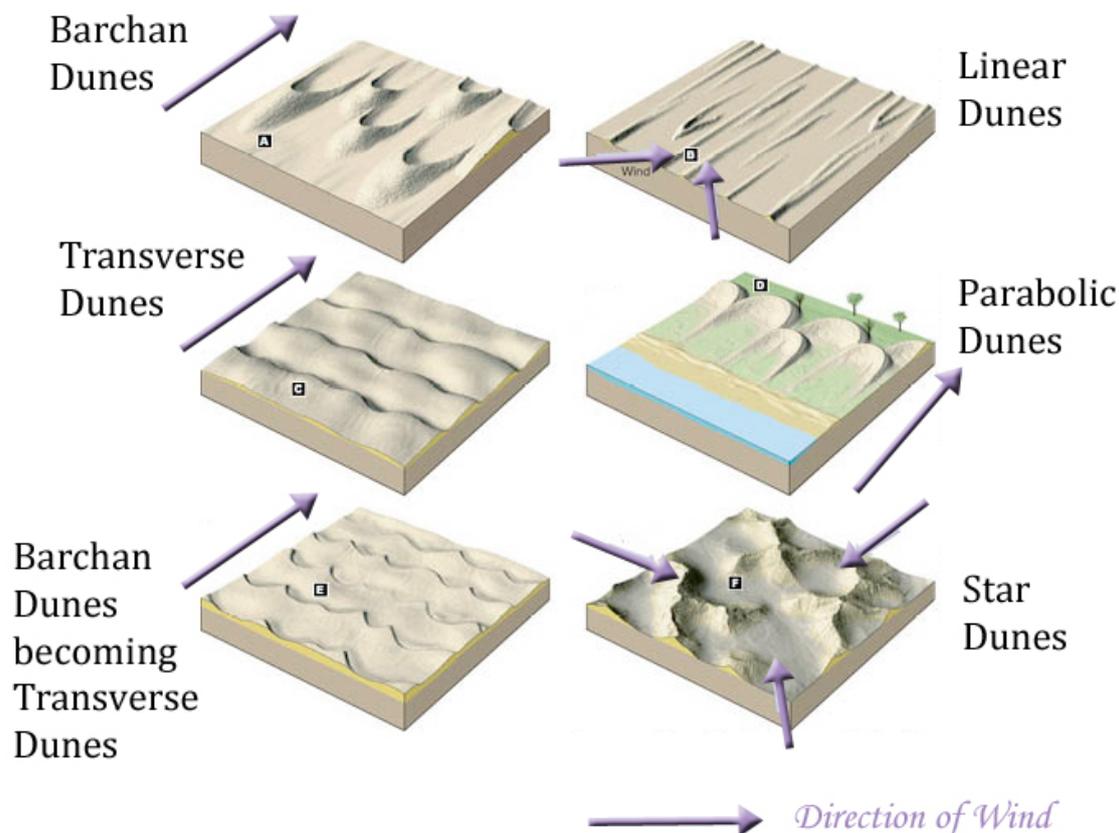
As partículas de areia segundo Pedraza (1996) podem se mobilizar por translação, reptação, saltação e suspensão, sendo que estes tipos de transporte dependem do tamanho do grão das partículas disponíveis. A saltação é um dos mecanismos de transporte mais importantes, movimentação das partículas perdendo contato com o solo, refere-se ao levantamento da partícula cujo recorrido corresponde a uma trajetória balística e cai impactando a superfície, causando o levantamento de outros grãos, produzindo um efeito cascata que permite a mobilização dos grãos de areia nos campos de dunas (PEDRAZA, 1996; GUTIERREZ, 2001).

Uma das formas de acumulação eólica que mais chama a atenção corresponde as dunas presentes em áreas desérticas e litorâneas, embora existem dificuldades na diferenciação entre as dunas formadas em ambientes diferentes (GUTIERREZ, 2001).

No início, o desenvolvimento e a morfologia de equilíbrio das dunas dependem do balanço entre erosão e sedimentação, quando diminui o transporte de areia, se produz sedimentação e elevação da acumulação. As pequenas acumulações eólicas podem constituir o início da formação das dunas. Quando as velocidades de transporte de areias são elevadas, o fluxo é maior do que a sedimentação, desenvolvendo-se mantos de areia e barcanas. O transporte de areia se produz só na parte da crista da duna nas épocas cuja velocidade do vento é baixa, enquanto nos períodos de ventos fortes tem maior mobilização em toda a duna (GUTIERREZ, 2001).

Existem diversas classificações sobre tipos de dunas (Figura 3), utilizando diversos nomes para denominar as diferentes formas, de acordo com a: dimensão; morfologia e aparência externa; morfodinâmica, causando confusão no momento de classificar as dunas presentes em uma determinada área de estudo. A seguir são descritas as dunas encontradas na área de estudo:

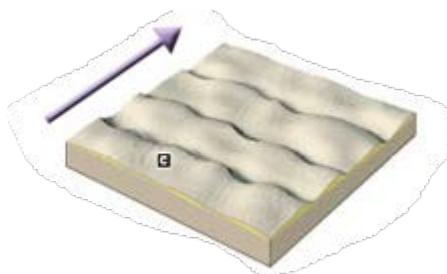
Figura 3. Tipos de Dunas



Fonte: <https://socratic.org/questions/what-are-the-different-types-of-sand-dunes>

A) Dunas Transversais: a direção principal do fluxo de areia é perpendicular à crista, estas dunas crescem e mantem a forma e tamanho, são mais compridas na direção perpendicular do vento predominante, a parte de barlovento possui menor declividade do que a parte de sotavento (Figura 4). Este tipo de duna tem seu início no transporte de material, que produzem as oscilações aerodinâmicas geradas por obstruções e inversões no vento (GUTIERREZ, 2001).

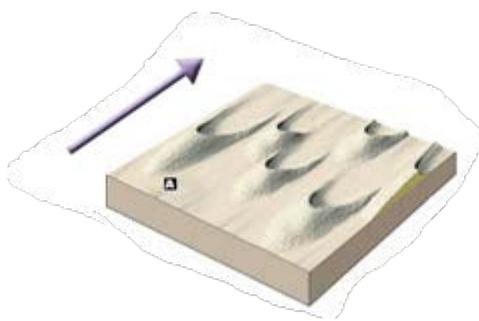
Figura 4. Dunas Transversais



Fonte: <https://socratic.org/questions/what-are-the-different-types-of-sand-dunes>

B) Dunas barcanas: se refere a dunas isoladas em forma de meia lua desenvolvidas em corredores de transporte de areias com relação as áreas de deposição (Figura 5). As dunas de menor tamanho se deslocam mais rapidamente do que as de maior tamanho. A área de barlovento é convexa, com declividade próxima a 12° enquanto a declividade do sotavento é de $33 - 34^\circ$, sendo que os extremos apontam no sentido da direção do vento. A velocidade de avanço da duna tem relação direta com a velocidade de transporte de areia sobre a crista e relação inversa com a altura da crista (PYE E TSOAR, 2009).

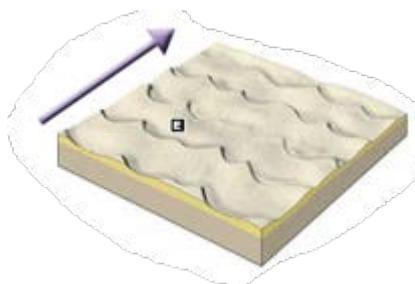
Figura 5. Dunas Barcanas



Fonte: <https://socratic.org/questions/what-are-the-different-types-of-sand-dunes>

C) Dunas barcanóide: Segundo Fryberger e Goudie (1981), conforme aumentam as quantidades de areia, as dunas barcanas unem-se lateralmente formando cordões barcanóides (Figura 6). Estas dunas são caracterizadas por possuir um cordão principal que pode ter entre 20 a 80 m de altura a partir da área interdunal, com várias barcanóides na parte superior da área de sotavento e cristas. O espaço entre os cordões pode variar entre 700 e 2000m, sendo característica a erosão na área de barlovento e sedimentação na área de sotavento. A alternância de formas com cristas convexas e um suministro de areia mais limitado pode transformar dunas transversais em dunas barcanóides e até barcanas com movimentos de até 50 m por ano (PEDRAZA, 1996).

Figura 6. Dunas Barcanoides



Fonte: <https://socratic.org/questions/what-are-the-different-types-of-sand-dunes>

D) Dunas fixas: denominadas fitogenéticas por Gutiérrez (2001), são dunas obstaculizadas pela vegetação, onde a areia eólica estabiliza ao redor das plantas, como é caso das dunas costeiras (Figura 7). Pela escassa mobilidade viram lugares idóneos para o crescimento de vegetação devido a retenção hídrica pela areia. Estas dunas são evidências de climas mais secos no passado e são indicadores de paleodesertos.

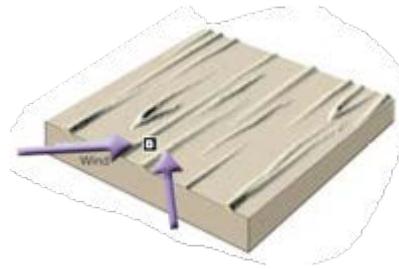
Figura 7. Dunas Fixas



Fonte: <http://www.fortalezaemfotos.com.br/2011/07/parque-natural-municipal-e-apa-das.html>

E) Dunas longitudinais: são caracterizadas por seu comprimento considerável, retilinidade relativa, comumente paralelos e separados por uma larga e plana superfície interdunar (Figura 8). Também chamadas de dunas lineares simples consistem em uma única crista de duna estreita com uma linha reta ou linha de crista sinuosa que pode ser arredondada ou aguda em seção transversal (PYE E TSOAR, 2009).

Figura 8. Dunas Longitudinais



Fonte: <https://socratic.org/questions/what-are-the-different-types-of-sand-dunes>

No seguimento da morfologia das dunas, Pedraza (1996) sugere a utilização de fotografias aéreas a escala 1: 2000 para dunas e 1: 20.000 para megadunas, assim como imagens de sensores remotos óticas e de radar de média e alta resolução espacial. Este método permite a análise de padrões dunares e migração, até avaliar o volume de areia mobilizada.

As dunas são sensíveis às modificações tais como direção e intensidade do vento, assim como mudanças na precipitação, fatores que afetam a evapotranspiração, umidade do solo, porcentagem de cobertura vegetal e mobilidade das partículas de areia. Os campos de dunas são áreas onde é possível observar com ênfase os efeitos dos períodos secos e úmidos, já que eles respondem rapidamente às mudanças climáticas.

Quando os períodos de precipitação são importantes e prolongados, o nível freático sobe e aflora nas partes baixas gerando lagoas interdunais, além de fixar outro tipo de vegetação de maior tamanho que ajuda a estabilizar as dunas. No caso dos períodos secos, acontece o contrário, os níveis freáticos são baixos, apresentando-se uma disponibilidade hídrica baixa que impede o crescimento da vegetação, favorecendo a atividade eólica nesses períodos.

O conhecimento e avaliação da atividade das dunas é impreciso por ser um ambiente altamente dinâmico, a grande variabilidade interanual no caso das áreas com climas semiáridos limita a análise, de tal forma que alguns anos mais secos as dunas são ativas enquanto outros anos onde ocorre maior precipitação as dunas perdem parte da sua mobilidade e podem chegar até estabilizar-se.

3.2 Sensoriamento remoto e estudos sobre Dunas

O sensoriamento remoto converteu-se em uma ferramenta importante no estudo de campos de dunas desde o ponto de vista qualitativo (padrões,

hierarquias, tipos de dunas) e quantitativo (volume, superfície, taxa de migração). A diversidade dos padrões de dunas tanto na terra como em outros planetas tem sido revelada a partir de dados de sensoriamento remoto (HUGENHOLZ et al, 2012; DONG, 2015).

Para as medições de deslocamento das dunas o método mais popular é a medição da distância entre duas linhas que representam a posição sucessiva da duna, tais como as cristas, como mostra o trabalho de Jimenez et al (1999), Yao et al (2007), Lancaster e McCarley-Holder (2012). O desenho destas linhas geralmente é baseado em interpretação visual, método cuja objetividade tem sido questionada já que deixa a critério do analista a direção, o início e o final das linhas que representam as posições da duna. Desenhar a posição da crista das dunas é um método de análise de movimentos de dunas, sendo considerado recomendável na análise morfológica de migrações de dunas (HUGENHOLTZ et al., 2012).

Diversos métodos para detecção de mudanças em campos de dunas têm sido aplicados, utilizando desde fotografias aéreas até imagens de satélite. O trabalho de Brown e Arbogast (1999) aplicou métodos fotogramétricos digitais sobre fotos aéreas históricas, gerando um DEM e computando o fluxo de volume de sedimentos num período de 22 anos, com a finalidade de realizar um monitoramento geomorfológico de um campo de dunas. Collado et al. (2002), aplicou o método de análise de mistura espectral para monitoramento de áreas com desertificação, revelando movimentos de dunas e padrões de uso do solo. Fadhil (2013) realizou monitoramento e mapeamento de invasão de dunas no centro-norte de Iraque utilizando índices normalizados de vegetação, de areia, indicador umidade da transformação Tasseled Cap e Temperatura de Superfície. Araújo (2015) realizou uma análise multitemporal vetorizando a borda das dunas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses e gerando mapas com o deslocamento das dunas no período de 31 anos, identificando áreas de avanço e retração. Pedrosa (2016) realiza a análise da dinâmica do campo de dunas moveis na região de Canoa Quebrada com base as taxas de migração entre 1988 e 2013 utilizando fotografias aéreas e imagens de satélite QuickBird, criando linhas no limite do campo de dunas para criar transectos de cálculo de taxas de migração.

O monitoramento das dunas com imagens de sensores remotos pode ser utilizado para medir respostas da superfície às mudanças ambientais, incluindo movimento de sedimentos, direção, tempo e magnitude dos eventos.

3.3 Análise linear de mistura espectral

A resposta espectral de um pixel da imagem corresponde a combinação da resposta espectral dos componentes que formam esse pixel. Estes componentes têm a ver com os diferentes materiais ou objetos sobre a superfície terrestre que emitem um fluxo de radiação detectado pelo sensor. Existem pixels que se encontram dentro de uma classe de cobertura enquanto outros apresentam mistura de classes em diferentes proporções (PONZONI et al., 2012).

A presença de essas proporções em um pixel é denominada mistura espectral, que ocorre quando os objetos são menores do que o tamanho do pixel ou quando o pixel faz parte da fronteira entre dois ou mais objetos maiores do que ele. Neste caso as informações registradas pelo sensor não são representativas de algum dos materiais presentes no pixel (SHIMABUKURO E PONZONI, 2017).

A maior parte das cenas tomadas pelos diversos sensores sobre a superfície terrestre geralmente contém um grande número de componentes na mistura espectral, o que representa um problema, pois mascara a resposta espectral característica de cada alvo dificultando a aplicação das técnicas de classificação digital. Desde a década dos anos 70 vem surgindo discussões sobre a complexidade da mistura espectral e também se tem desenvolvido diversas aplicações que permitiram a extração das proporções dos materiais contidos em cada elemento da cena em função do comportamento espectral do alvo.

A mistura espectral pode ser lineal ou não lineal, sendo a mais utilizada o modelo lineal. A resposta espectral de cada pixel, em qualquer banda espectral pode ser considerada como uma combinação linear das respostas de cada componente presente na mistura. Desta forma, cada pixel da imagem que assume qualquer valor dentro da escala de cinza, inclui informações sobre a

proporção e a resposta espectral de cada componente (SHIMABUKURO et al, 1998)

A Análise de Mistura Espectral (AME) parte de alguns supostos tais como: a radiação recebida pelo sensor desde cada alvo, restringe-se ao âmbito do pixel, o sinal procedente de uma cobertura vizinha não tem influência. A radiância global é proporcional a superfície ocupada por cada coberta, pelo que nenhum dos componentes do pixel não tem uma ponderação maior a sua própria superfície. A mistura lineal só aplica nas bandas do espectro óptico, não no térmico. Assume que existem assinaturas espectrais puras que podem ser válidas para toda a área objeto da análise (SETTLE E DRAKE, 1993; QUARMBY et al, 1992; CHUVIECO, 2010).

Considerando os supostos previamente mencionados a AME é um modelo no qual o valor do pixel em qualquer banda espectral é considerado como a combinação linear da resposta de cada componente dentro do pixel, onde a reflectância de um pixel com mistura é uma combinação lineal da reflectância característica um conjunto de componentes puros ou membros de referência (MR), também chamados de *endmembers*, em proporção equivalente a superfície que ocupam (ADAMS et al. 1986; SHIMABUKURO E SMITH, 1991)

O modelo pode ser expresso como:

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j,k} \quad (1)$$

Onde: $\rho_{i,j,k}$: reflectância espectral no pixel i,j na banda k

$F_{i,j,m}$: Proporção do componente m no pixel i,j para cada um dos p componentes puros

$\rho_{m,k}$: reflectância característica do componente m na banda k

$e_{i,j}$: erro de estimação associado as proporções em cada pixel i,j

A proporção de cada componente puro F_m deve estar entre 0 e 1, sendo que não pode ter proporções negativas, indica que a somatória das proporções para todos os componentes é igual a superfície total do pixel.

$$\sum_{i=1}^N f_i = 1, \text{ onde } 0 \leq f_i \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{m=1, \rho} F_{i,j,m} = 1 \quad 0 \leq F_{i,j,m} \leq 1$$

Para o processo de seleção dos componentes puros ou membros referência, é aplicada a metodologia estabelecida por Boardman & Kruse (1994) e Carvalho et al (2003) que consiste em três etapas: redução da dimensão espectral (MNF), redução da dimensão espacial (índice de pureza do pixel) e identificação (utilizando um visualizador n-dimensional).

Na redução da dimensão espacial é utilizado o método Fração do Mínimo Ruído (MNF, *Minimum Noise Fraction*) de Green et al (1988) consiste na aplicação de duas análises de componentes principais (ACP) consecutivos, o primeiro ACP com base em uma estimativa da matriz de covariância residual, permite eliminar redundâncias e redimensionar o ruído dos dados, o segundo ACP é sobre os dados redimensionados. O ruído é estimado a partir dos componentes mais marginais dos autovalores, concentrando a análise naqueles que retêm a maioria das informações originais.

Na redução da dimensão espacial é utilizado o Índice de Pureza de Pixel (PPI, *Pixel Purity Index*) de Boardman et al (1995), que busca estipular o quanto o pixel é extremo dentro do conjunto de dados. O método registra e contabiliza os píxeis nas diferentes projeções do simplex¹, sendo que os píxeis relativamente mais puros tendem a se repetir aumento seu valor de PPI até ser considerado puro. Quanto maior for o número de interações, melhor o resultado.

A redução da dimensão espacial é um gráfico que mostra o número de iterações com o número de píxeis que correspondem a condição de pixel puro,

¹ Simplex é um procedimento que visa identificar os vértices de um conjunto convexo, formando uma figura num espaço n-dimensional que facilite a visualização de uma nuvem de píxeis (Carvalho et al, 2003).

sendo que quando a curva do gráfico se torna próxima de um patamar indica que o número de interações pode ser considerado satisfatório para a análise. A imagem resultante, mostra para cada pixel, o número de vezes que foi definido como puro. Quanto maior for o valor do pixel na imagem PPI, maior é seu valor de pureza.

A identificação e seleção dos píxeis puros, representa um procedimento de visualização, onde é gerada uma nuvem de pontos em um espaço n-dimensional definido pelas componentes em análise. De acordo com Boardman e Kruse (1994), permite rotacionar a nuvem de pontos de forma aleatória até encontrar um posicionamento que melhor discrimine os grupos de espectros.

Os píxeis que com maior frequência alcançam os extremos da nuvem, são considerados os mais puros. A visualização proporciona uma melhor percepção dos agrupamentos de pontos, facilitando a interpretação, separação e individualização das nuvens. A separação dos píxeis puros é realizada manualmente por meio de uma ferramenta de desenho interativo que ajuda o analista a definir as classes, que também podem ser analisadas por processos estatísticos.

Uma vez que as respostas espectrais dos componentes puros são obtidas diretamente das imagens, sendo, portanto, conhecidas, são então estimadas as proporções de cada componente dentro dos píxeis, gerando as imagens-fração correspondentes.

As proporções são calculadas com o intuito de reduzir tanto quanto for possível o erro residual de cada pixel, sendo nesta fase onde é aplicada a inversão do modelo, utilizando o critério de ajuste por mínimos quadrados, estimando a proporção de cada componente dentro do pixel minimizando a soma dos erros ao quadrado, de tal forma que os valores que serão estimados ($F_{i,j,m}$) permitam minimizar o erro, de acordo com a equação 3.

$$e_{i,j,k} = \rho_{i,j,k} - \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} \quad (3)$$

As imagens fração resultantes são os produtos finais da análise de mistura espectral, representando as proporções dos componentes na mistura espectral,

que correspondem ao número de componentes puros identificados pelo modelo, não excedendo o número de bandas que conformam a imagem. Normalmente são geradas as frações de vegetação, solo, sombra e água, que são os alvos sempre presentes na superfície terrestre. As imagens fração mostram as informações com realce, transformando a informação espectral em informação física (PONZONI et al, 2012).

3.4 Aritmética de Bandas

As operações aritméticas aplicadas a duas imagens são métodos de detecção de mudanças simples. Estas operações proporcionam uma imagem diferença que reflete a magnitude da mudança na superfície, proporcionando um significado temático a imagem diferença. Esta técnica tem sido bastante utilizada para ressaltar rapidamente áreas de mudança na imagem (TEWKESBURY, 2015).

De acordo com Singh (1989) as operações aritméticas são aplicadas a bandas de imagens adquiridas em diferentes datas para detectar mudanças entre imagens. Diferenças de bandas e índices são geralmente aplicados entre uma única banda de cada imagem de diferente data. Diferença de imagens envolve subtrair imagens de diferentes datas, dando como resultado uma imagem de mudança com valores positivos e negativos em áreas de variação de radiância e valor zero em áreas de não mudança. O gráfico de distribuição dos dados na imagem de mudança, semelhante a uma distribuição gaussiana, mostra a concentração dos píxeis cujo valor de brilho não mudou, distribuídos ao redor da média, enquanto os píxeis de mudança são encontrados aos extremos do gráfico (SINGH, 1989).

3.5 Considerações sobre detecção de mudanças

O sensoriamento remoto tem a capacidade de capturar dados de mudanças, mas extrair essa informação requer técnicas de detecção de mudanças efetivas e automáticas. Neste sentido, a forma digital é o processo para determinar e/ou descrever mudanças no uso e cobertura da terra baseado no co-registro de dados multitemporais de sensores remotos, para identificar

mudanças nas características de variação normal entre duas ou mais datas. O problema do monitoramento de mudanças com acurácia tem sido abordado por diversos pesquisadores numa ampla diversidade de ambientes (SHALABY E TATEISHI, 2007; SINGH, 1989).

Muitos métodos utilizados para detecção de mudanças foram desenvolvidos ao longo de várias décadas. Alguns deles consolidados em diversas pesquisas, outros revisados na busca de melhoras para futuros desenvolvimentos, mas a maioria dos autores concorda que não existe um método universal para detecção de mudanças nem o método mais adequado para uma área de estudo particular (LU et al, 2003; TEWKESBURY, 2015).

Com a existência de numerosos métodos para detecção de mudanças, aplicados em diversas pesquisas, pode-se inferir que não existe um único ou melhor método, já que existe uma série de fatores a ser considerados para garantir resultados próximos e coerentes com a realidade da área em estudo, deixando desta forma aos usuários ou pesquisadores escolher entre diversas opções.

Tewkesbury (2015) sintetiza a técnica de detecção de mudanças em quatro componentes: pré-processamento das imagens de entrada, unidade de análise, métodos de comparação e mapa de mudanças derivado para interpretação e avaliação de precisão.

No sensoriamento remoto a mudança é apreciada quando a diferença dos valores de radiância entre duas diferentes datas para um tipo de cobertura, é assumido como um indicador de mudança, mas deve ser considerada a influência de fatores como: iluminação, condições atmosféricas, calibração do sensor, diferenças nas condições e umidade do solo, diferenças no registro das imagens, diferenças no ângulo solar; aspectos que podem ser minimizados escolhendo imagens com uma mesma data e correspondentes a uma mesma época do ano, sendo assim um enfoque mutiestacional que ajuda a isolar as mudanças do terreno de forma mais fácil (SINGH, 1989).

3.6 Energia eólica no Ceará

A energia eólica, vista como fonte de energia alternativa à produzida por combustíveis fósseis e hidroelétricas, se caracteriza como a energia cinética tendo como fonte as massas de ar. A geração eólico-elétrica ocorre pelo contato do vento com as pás da turbina. Ao girar a energia cinética é convertida em energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, produzindo eletricidade (SOARES, 2010).

A produção de energia a partir da força dos ventos surge como uma das principais alternativas para a produção de energia limpa e renovável desde o século XX em diversas partes do mundo e entra na discussão do chamado desenvolvimento sustentável (EIA, 2020).

Desde o início dos anos 1990 diversos levantamentos e estudos voltados a identificação de dados de superfície e a valoração do potencial eólico em níveis local, regional e nacional, fundamentam e motivam a exploração comercial deste tipo de energia no Brasil. O início na história do aproveitamento da energia eólica no Brasil foi a instalação da primeira turbina eólica em Fernando de Noronha em 1992. Dez anos depois, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) para incentivar a utilização de outras fontes renováveis, como eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) (SOARES, 2010).

A grande maioria de estudos e levantamentos realizados aponta o litoral do nordeste brasileiro como a região que dispõe das melhores condições para a produção de energia eólica. Conforme dados publicados no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al, 2001), do Panorama do Potencial Eólico no Brasil (FEITOSA et al, 2003) e do Atlas do Potencial Eólico Ceará (SEINFRA, 2004), a planície litorânea do Ceará é uma das regiões com maior potencial natural, e os fatores básicos que caracterizam esse potencial são a posição geográfica, o regime de ventos constantes e a existência de relevo favorável ao desenvolvimento desta atividade.

A planície costeira do Baixo Jaguaribe no Município de Aracati, no Estado do Ceará, faz parte desta realidade. A partir do ano de 2008, essa faixa litorânea apresenta uma mudança importante sobre o campo de dunas móveis. Nesta área foi instalado um dos primeiros parques eólicos de grande porte e

importância no estado do Ceará, dunas com algumas diferenças morfológicas y próximos a comunidades tradicionais, elementos que mostraram diversos problemas sócio-ambientais em nome de uma energia “limpa” a partir de um recurso renovável como o vento (MEIRELES ET AL 2013, GORAYEB ET AL, 2016, MENDES, 2016).

3.7 Conceitos básicos em Sensoriamento Remoto

O desenvolvimento inicial do Sensoriamento Remoto está ligado ao desenvolvimento da fotografia e à pesquisa espacial até se chegar a várias definições propostas por Chuvieco (1996), Meneses (2001), Schowengerdt (2007) e Novo (2008). Elas podem ser resumidas como o conjunto de técnicas que permitem a obtenção de informação sobre objetos na superfície da Terra, sem que haja contato físico entre o sensor e o objeto. Esse processo só pode ser realizado utilizando sensores e equipamentos a bordo de aeronaves, satélites, drones assim como os espectrômetros de campo, que servem para registro, processamento e transmissão de dados relacionados com a interação da radiação eletromagnética com os objetos da superfície terrestre.

A fonte de Radiação Electromagnética (REM) para o caso dos sensores passivos é o Sol, para os sensores ativos de micro-ondas são as antenas de micro-ondas dos sistemas radares. O sensor que é o instrumento capaz de coletar e registrar a REM refletida ou emitida pelo alvo, que representa o elemento do qual se pretende extrair informação. As características dos objetos são registradas pelo sensor, em números digitais, que logo podem ser convertidos em valores de radiância ou intensidade de reflectância dos mesmos.

O Número Digital (ND) pode ser definido como a intensidade do "pixel". Sua amplitude muda de acordo com a resolução radiométrica do sensor. Os níveis digitais são relacionados com a intensidade da energia radiante refletida através de um modelo linear (calibração)². Permitem a análise quantitativa de uma imagem e não são diretamente comparáveis entre satélites devido às

2 É referido ao termo calibração do sensor, também chamados coeficientes de calibração que permitem a conversão de níveis digitais (ND) a valores físicos de radiância, mantendo a relação entre o valor do "pixel" (ND) gravado em uma localização particular e a reflectância do material na superfície. Para cada sensor existem coeficientes de calibração desenvolvidos especificamente para cada um (MATHER, 2004).

diferenças na calibração dos sensores (MATHER, 2004; SCHOWENGERDT, 2007).

3.8 Sensores passivos de alta resolução espacial

Os sensores passivos, são equipamentos de sensoriamento remoto que registram a energia eletromagnética que é refletida ou emitida pela superfície do planeta Terra, captando a radiação nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho, devido a que não emitem sua própria radiação (JENSEN, 2009).

A utilização de satélites artificiais transportando sensores passivos é uma das técnicas mais utilizadas atualmente. Como exemplo temos o LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*); o projeto teve início na segunda metade da década de 60 do século XX, e foi desenvolvido pela Agência Espacial Americana e se mantém até hoje.

Outros programas espaciais foram surgindo e novos satélites foram desenvolvidos, procurando melhoras tecnológicas no satélite e na resolução espacial do sensor, até chegar às imagens de alta resolução espacial.

3.8.1 SPOT

Os satélites SPOT fazem parte do programa espacial francês. O programa SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*) teve seu início em 1978, na França pelo CNES (*Centre national d'études spatiales* - a agência espacial francesa) e desenvolvido em associação com o SSTC (Serviços técnicos, culturais e científicos da Bélgica). Foi concebido como um sistema comercial, no qual as imagens são adquiridas sob encomenda (LILLESAND, T. ET AL., 2004).

O primeiro satélite SPOT foi lançado em 1986 e incorporou uma série de inovações tecnológicas, tanto nos sensores *HRV* quanto nos modos de aquisição de dados. O imageador opera por varredura eletrônica do tipo "*push-broom*". A banda pancromática oferecia uma resolução espacial de 10 m e a possibilidade de orientar os sensores lateralmente 27° permitindo a criação de pares estereoscópicos. A resolução espectral é reduzida comparada com às bandas de Landsat e as cenas são de um tamanho menor (60km x 60km). Os satélites SPOT 4 e 5 lançados em 1998 e 2002, melhoraram com o sensor *HRVIR* e incorporaram o sensor *Vegetation*, que é um radiômetro de varredura

eletrônica multiespectral com uma resolução espacial de 1,15 km x 1,15 km (LILLESAND, T. ET AL., 2004).

O SPOT 5 melhorou a resolução das bandas multiespectrais para 10 m, da banda pancromática para 5m e o produto de 2,5 m (super modo), incorporando o sensor *HRG* para a produção de pares estereoscópicos (SPOT IMAGE, 2009). As características dos satélites SPOT encontra-se no quadro 2.

A família de satélites SPOT constituem o segundo (depois de Landsat) longo repositório de imagens óticas do mundo, com cerca de 30 milhões de imagens adquiridas desde 1986. A partir de 2014, seguindo o exemplo da USGS, o *Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)*, inicia o programa *SPOT World Heritage (SWH)* cujo objetivo é disponibilizar de forma gratuita para usos não comerciais, imagens satélites SPOT 1, 2, 3, 4 e 5 desde o ano 1986 até 2015 (MEMORIS, 2015). Atualmente estão disponíveis nos níveis de processamento 1A e 2A. As imagens SPOT 6 e 7, são comercializadas pela *Astrium Services* filial de *Airbus Defence & Space* que manteve a continuidade do programa SPOT.

3.8.2 QuickBird

O satélite QuickBird foi construído para obter imagens com resolução submétrica, 2,44 m em modo multiespectral e 0,61 em modo pancromático, com vantagens como alta qualidade da imagem e alta precisão geométrica. Projetado e construído em cooperação entre as empresas *Ball Aerospace & Technologies Corp* e controlado pela empresa *DigitalGlobe*, possuía sensores CCD (*Charge Coupled Device*), que realizam a varredura eletrônica em fileira linear (*pushbroom linear array*), sendo flexíveis para visadas off-nadir até 25°, ao longo do terreno imageado. Foi colocado em órbita em 18.10.2001 e gerou imagens até dezembro de 2014. Atualmente está fora de serviço (DIGITALGLOBE, 2013 e 2016). No quadro 3 podemos ver algumas das características deste sistema satélite e sensor.

Quadro 2. Características do Satélite SPOT

	SPOT 1,2,3	SPOT 4	SPOT 5	SPOT 6 e 7
Instrumento sensor	2 HRV	2 HRVIR Vegetation	2HRG Vegetation	2 NAOMI
Inclinação da órbita – linha do Equador	98,7°			98,23°
Sentido da órbita	Descendente 10:30 a.m.			Descendente 10:00 a.m.
Duração da órbita	101,4 min a 822 km de altitude			98,79 a 694 km de altitude
Tipo de órbita	Heliosíncrona			
Tempo de revisita	26 dias			
Largura nominal da faixa imageada	60 x 60 km			
Bandas Espectrais	Verde (500-590nm), Vermelho (610-680nm), Infravermelho Próximo (780-890nm) Pan (510-730nm)	Verde (500-590nm), Vermelho (610-680nm), Infravermelho Próximo (780-890nm) SWIR (1580 nm-1750nm) Mono (610-680nm)	Verde (500-590nm), Vermelho (610-680nm), Infravermelho Próximo (780-890nm), SWIR (1580 nm-1750nm) Pan (450-745nm)	Azul(454-744nm) Verde (527-587nm), Vermelho (624-694nm), Infravermelho Próximo (756-880nm), Pan (455-744nm)
Resolução espacial	Multiespectral 20 m Pan 10 m	Multiespectral 20 m Pan 10 m Veg (1 km)	Multiespectral 10 m Pan 5m Veg (1 km)	Multiespectral 6 m Pan 1,5 m
Resolução radiométrica	8 bits			12 bits
Lançamento	SPOT 1: 22/02/1986 SPOT 2: 22/01/1990 SPOT 3: 26/09/1993	24/03/1998	04/05/2002	SPOT 6: 09/09/2012 SPOT 7: 30/06/2014
Situação atual	Fim de operações	Fim de operações 11/01/2013	Fim de operações 31/03/2015	Operativo

Fonte: SPOT Images (2010). <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/62>. Airbus (2013)

Quadro 3. Características do satélite QuickBird.

CARACTERÍSTICA	INFORMAÇÃO
Inclinação da órbita – linha do Equador	97,2°
Sentido da órbita	Descendente 10:30 a.m.
Duração da órbita	93,5 min a 450 km de altitude
Tipo de órbita	Heliossíncrona
Tempo de revisita	1-3,5 dias, conforme a latitude
Largura nominal da faixa imageada	16,5 km (nadir)
Bandas Espectrais	Azul (440–520nm), Verde (520-600nm), Vermelho (630-690nm), Infravermelho Próximo (760-900nm)
Resolução espacial	Pan: 61 cm.; Multiespectral: 2,44 m
Resolução radiométrica	11 bits
Capacidade de armazenamento de dados	~128 Gbit (aprox. 57 cenas)
Massa do satélite	1018 kg
Capacidade do satélite	563 W
Tempo de vida útil previsto	> 5 anos

Fonte: DigitalGlobe, 2017

3.9 Grandezas radiométricas

As grandezas radiométricas são aquelas usadas para descrever a radiação óptica (JENSEN, 2009). Nas interações energia – matéria na atmosfera encontram-se a refração, espalhamento, absorção e reflectância. Todas elas, por interagirem com a atmosfera, influenciam no conteúdo de informação dos dados de sensoriamento remoto. A absorção e reflectância exibem características importantes no sensoriamento remoto.

A radiância é o primeiro parâmetro que é obtido a partir dos níveis digitais da imagem, que permite calcular a reflectância. No sensoriamento remoto é possível quantificar e reduzir as incertezas, uma dessas formas é mediante o cálculo da reflectância de superfície, produto comum no caso da calibração radiométrica e correção atmosférica (BORENGASSER et al., 2008).

A reflectância é definida, segundo Slater (1980), Schowengerdt (2007) e Borengasser et al. (2008), como a razão entre o fluxo de energia radiante (Q) refletida e a incidente, sobre um alvo ou área de interesse. É adimensional e geralmente se expressa em porcentagem.

A reflectância é uma das propriedades intrínsecas do alvo, definida pelas características físicas, químicas e biológicas deste, e varia espectralmente. A reflectância é uma propriedade espectral, ou seja, varia de acordo com o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente no alvo (PEREIRA et al., 2006; ARAI et al., 2007).

A reflectância é uma propriedade espectral. Trata-se do parâmetro fundamental no estudo do comportamento espectral de alvos. As imagens de satélite registram informação sobre as características espectrais dos alvos sobre a superfície terrestre, mas as imagens ópticas usualmente são fornecidas com valores dos pixels em números digitais, os quais são adimensionais e não comparáveis com os de outras imagens. É conveniente transformar esses números para alguma grandeza física, geralmente reflectância, já que a radiância não seria o parâmetro mais adequado para avaliar espectralmente os alvos (MATHER, 2004).

3.10 Pre-processamento das imagens

Todas as imagens que se encontram em um primeiro nível de processamento, requerem de correções das distorções e degradações produto do processo de aquisição (LILLESAND, T. ET AL., 2004).

As distorções geométricas que podem afetar a integridade do mapa são tratadas com a correção geométrica da imagem, que pode ser por georreferenciamento e ortorretificação, a primeira opção, basicamente envolve a identificação de muitos pontos de controle nas imagens e sua correspondência

espacial de forma manual (FEDOROV, 2002); já a segunda inclui a utilização de um modelo digital de elevação no processo.

O processo de registro de imagens geralmente é feito manualmente. Neste caso o operador escolhe uma feição pontual, identificável, na imagem a corrigir e na imagem referência. O conjunto de pontos, que devem estar bem distribuídos na imagem, é chamado de pontos de controle, que servem para modelar a função de distorção entre as duas imagens. Esta tarefa é lenta, árdua e sujeita a erros, justamente porque possui o fator humano, que muitas vezes não tem experiência suficiente para realizá-la (LILLESAND, T. ET AL., 2004).

Além da correção geométrica, outros fatores como fatores de iluminação da cena, condições atmosféricas, resposta do sensor, também devem ser corrigidos (LILLESAND, T. ET AL., 2004).

Essa correção corresponde à conversão dos níveis digitais das imagens em valores físicos como reflectância. Este passo é importante, já que os níveis digitais não estão na mesma escala radiométrica nas diferentes bandas, o que quer dizer que um determinado valor de ND em uma determinada imagem de uma banda específica, não corresponde a mesma intensidade de radiação medida ou representada pelo mesmo valor de ND em outra imagem de outra banda espectral. Seriam gerados produtos que representariam coisas diferentes por estarem em escalas diferentes que impede sua comparação com valores disponíveis na literatura (PONZONI et al 2012).

Para tentar manter um padrão de qualidade de dados com reflectância de superfície, aspecto imprescindível para deixar os dados multitemporais na mesma escala radiométrica, é necessário realizar a conversão dos valores ND da imagem para valores de radiância e logo a correção atmosférica sobre a imagem radiância, com a qual se obtém a imagem reflectância de superfície.

A correção atmosférica de imagens de satélite é feita com a intenção de minimizar os efeitos atmosféricos na radiância de um alvo, visto que a atmosfera, devido aos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, afeta a radiância refletida ou emitida que é captada pelo sensor (MATHER, 2004).

Esta correção é feita para levar os valores de reflectância aparente ou do topo da atmosfera a reflectância da superfície, que é a fração da radiação solar recebida, refletida da superfície da Terra. A imagem de reflectância de superfície

aproxima o que seria realizada por um sensor medida logo acima da superfície da Terra, sem interferência da atmosfera ou iluminação e geometria de visada (GLCF, 2011).

De acordo com Ponzoni et al. (2012), existem vários métodos de correção atmosférica. Um deles é o método proposto por Chavez (1988), denominado Correção atmosférica pelo "pixel" escuro (*Dark Object Subtraction-DOS*), que identifica em cada banda espectral quais quantidades de ND ou fator de reflectância bidirecional (FRB) aparentes com valores maiores a "0" deveriam ser subtraídas de cada imagem, considerando que a interferência atmosférica é uniforme em toda a cena.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Na análise multitemporal foram utilizadas imagens orbitais imageadas em datas relacionadas a época de seca. Foram selecionadas várias datas de imagens do sensor SPOT 5 (com 10 metros de resolução espacial nas bandas multiespectrais) entre os anos 2002 até 2013 (Quadro 4) que se encaixavam no período antes e depois da construção do parque eólico, considerando que o satélite SPOT 5 se manteve em funcionamento entre 2002 e 2015.

As imagens obtidas pelo site da *SPOT World Heritage* (SWH) do CNES, foram solicitadas no nível 1 A, que não possuem correção geométrica nem radiométrica. Imagens entre os anos 2002 e 2005, 2008 e 2010 e 2012 não estão disponíveis. As imagens correspondentes ao sensor SPOT 5 da área de estudo, estão disponíveis apenas entre os anos 2002 e 2013 no site SWH.

Para validar os resultados das imagens SPOT foram utilizadas as Imagens QuickBird da SEMACE entre 2003 e 2009 para área de Aracati - CE, produtos PanSharpened e OrtoQuickColor, fusão de 3 bandas Multiespectrais, resolução de 2,40 m e 1 banda Pancromática de 0,60m, gerando a imagem fusão de 0,6 m de resolução espacial, composição cor natural.

Como dados auxiliares foram utilizados dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), de 1 arc seg, para criação do Modelo Digital de Elevação

(MDE) utilizado para a ortoretificação das imagens SPOT, estes dados estão disponíveis no site da United State Geological Survey (USGS).

Quadro 4. Imagens Disponíveis para Aracati – CE.

Sensor	Data
SPOT	15/10/2002
	28/06/2005
	19/08/2006
	28/07/2007
	03/09/2011
	02/09/2013
QuickBird	05/08/2003
	10/11/2003
	19/02/2004
	02/09/2008
	19/01/2009

Fonte: Autor

O processamento digital das imagens foi realizado com os softwares: *ERDAS Imagine 2014* e *ENVI 5.2*. A visualização, integração com dados SIG e representação, com os softwares *ArcGis 10.4* e *QGis 3.30*.

4.2 Métodos

4.2.1 Correção Geométrica

Para obter a correspondência espacial entre as imagens SPOT 5, foi utilizado o módulo AutoSync do ERDAS Imagine 2014, que alinha imagens de diferentes tipos, diferentes sensores ou com diferentes resoluções. Este software permite a escolha do modelo de transformação desejado e da imagem de referência. No presente caso, escolheu-se a transformação de afinidade (*default*) e uma imagem SPOT ortoretificada. No processo, é possível incluir pontos de

controle e selecionar uma linha de corte para o erro, que foi então fixado em 1 pixel no próximo passo, para obter um erro médio quadrático (RMSE) que ajude na avaliação do resultado, já que é um resultado acumulativo estatístico dos pontos de correspondência e de modelagem.

4.2.2 Correção Radiométrica

A correção radiométrica envolve a conversão dos valores ND da imagem para valores de radiância e logo a correção atmosférica sobre a imagem radiância, com a qual se obtém a imagem reflectância de superfície.

O primeiro passo foi a conversão dos valores ND da imagem para valores de radiância. As equações utilizadas correspondem às estabelecidas nas publicações técnicas CNES (2007) e no site SWH, encontradas sobre radiância e reflectância calculadas para reescalar o produto SWH-2A-Carto. Estas equações foram aplicadas com ajuda da ferramenta “Band Math” do ENVI. A radiância aparente foi calculada segundo a equação 4:

$$L\lambda = ND/G \quad (4)$$

Onde: λ corresponde à banda espectral da imagem (infravermelho próximo, infravermelho, verde, azul); $L\lambda$ é a radiância espectral para banda λ em (mW/cm²/μm/str); $Gain\lambda$ é o valor de ganho para cada banda; $ND\lambda$ são os valores de níveis digitais por cada banda.

A reflectância no topo da atmosfera (TOA) foi calculada segundo a equação 5:

$$\rho\lambda = \frac{\pi L\lambda}{\cos(\theta_s) Es\lambda} \quad (5)$$

Onde: $\rho\lambda$ é o valor de reflectância TOA; $L\lambda$ é a radiância aparente por banda em (mW/cm²/μm/str); – terra em unidades astronômicas; $Es(\lambda)$ é a Irradiância média do sol no topo da atmosfera (mW/cm²/μm); $\cos(\theta_s)$ é o cosseno do angulo solar zenital.

Os valores “ $Es\lambda$ ” é dado pela distância média terra-sol e deve ser multiplicado pelo fator de correção para distância terra-sol definida na equação

3. O valor de θ (ângulo solar zenital) foi obtido a partir dos metadados associados a cada imagem.

$$dsun = \frac{1}{(1 - e \cdot \cos(n(t - to)))^2} \quad (6)$$

Onde: t é o dia juliano correspondente à imagem processada, to é igual ao valor 2; e é a excentricidade orbital (0,01673); n é o ângulo de rotação médio (0,0172 rad/dia)

Os valores de Irradiâncias espectrais exoatmosféricas solares “Es” ($W/m^2/\mu m$) para os satélites SPOT e os sensores estão disponíveis no site <https://swh-2a-carto.fr/faq>.

Para a correção atmosférica e obtenção da imagem reflectância de superfície, foi utilizado o método *DOS* com ajuda da ferramenta “*Dark Subtract*” do ENVI utilizando os valores mínimos da imagem, que se baseia no pressuposto de que em toda cena deve haver um alvo de reflectância zero.

4.2.3 Trabalho de campo

A tese de Durán (2020) contemplou trabalhos de campo entre os dias: 24 e 25 de agosto de 2017 e 17 e 25 de novembro de 2017; 12 a 16 de agosto de 2018, nas áreas: (a) planície costeira entre Rio Jaguaribe - Campo de dunas - Olho d'água, (b) limite do tabuleiro, área de dunas móveis na praia de Cumbe e (c) manguezal do baixo Jaguaribe.

Foram levantados um total de 151 pontos, com as coordenadas UTM SIRGAS 2000 Fuso 24 S, medidas com GPS etrex da Garmim, registro fotográfico e anotações sobre: tipo de dunas, características do parque eólico e o tipo de uso e cobertura da terra observada.

Estes trabalhos de campo trouxeram uma comprovação da realidade que permitiu desenvolver a pesquisa de Durán (2020) e facilitou para este trabalho utilizar um dos métodos com outras imagens de outros sensores de maior resolução espacial, para avaliar se oferece melhores resultados.

4.2.4 Métodos de detecção de mudanças

4.2.4.1 Diferença entre imagens

Relacionado ao método de pós classificação, refere-se a uma operação aritmética entre imagens de duas datas, classificadas, para discriminar as áreas por classe que experimentaram mudanças nessas datas. O cálculo seria com a seguinte fórmula:

$$IMc = IMt2 - IMt1 \quad (7)$$

Onde IMc indica a imagem de mudança, IMt1 e IMt2 corresponde a imagem da data inicial e data final respectivamente.

A imagem de mudanças, mostra as áreas sem mudanças escuras, áreas com mudança claras e tons intermediários para áreas estáveis. O histograma da imagem de mudanças tem um perfil gaussiano, com as máximas frequências para as zonas estáveis (centro do histograma) e as dinâmicas nos extremos da distribuição.

4.2.4.1 Análise de Mistura Espectral

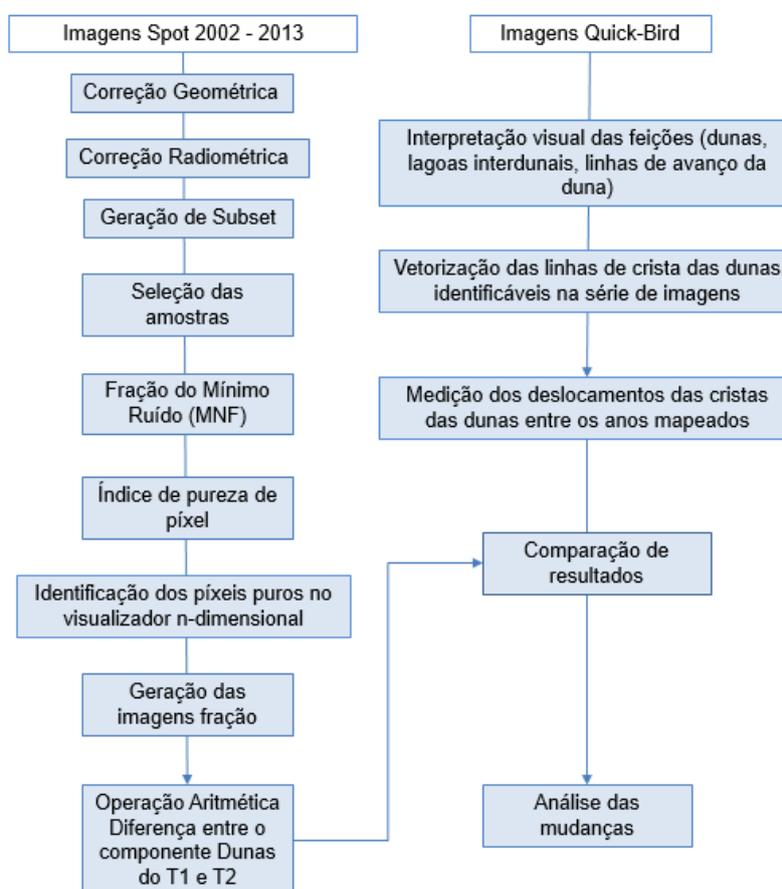
Para destacar mudanças no campo de dunas móveis utilizando dados espectrais ao nível de sub-píxel, onde as variações podem ser imperceptíveis a escala média, foi aplicado o método de análise de mistura espectral (AME), disponível no software *Envi 5.2*. A mistura espectral se refere a que cada píxel possui proporções de resposta espectral que podem ser separadas (SHIMABUKURO et al., 1998).

O processamento das imagens consiste em três etapas: redução da dimensão espectral (MNF), redução da dimensão espacial (índice de pureza do píxel) com 12.000 iterações, consideradas satisfatórias para a análise e identificação (utilizando um visualizador n-dimensional). A separação dos píxeis puros é realizada manualmente por meio de uma ferramenta de desenho interativo que ajuda o analista a definir as classes, que também podem ser analisadas por processos estatísticos.

Uma vez que as respostas espectrais dos componentes puros foram obtidas diretamente das imagens, foram estimadas as proporções de cada componente dentro dos píxeis, gerando as imagens-fração: água, vegetação, dunas. Para observação e análise das mudanças e valores de deslocamento, foi aplicado uma diferença entre o componente dunas do tempo 1 (T1) e tempo 2 (T2), colocando o componente dunas na composição RGB na ordem: Tempo 1 – Tempo 2 – Tempo 1.

As imagens QuickBird foram utilizadas para validar os resultados da operação diferença entre bandas. Neste caso, foi realizada uma interpretação visual para identificar as cristas das dunas em cada imagem e proceder a vetoriza-las de acordo com os trabalhos de Jimenez et al (1999), Yao et al (2007), Lancaster e McCarley-Holder (2012). Posteriormente foi realizada a medição da distância entre as linhas de crista dos anos mapeados, para comparar com os resultados obtidos da diferença das bandas do componente AME dunas. A Figura 9 apresenta o esquema metodológico.

Figura 9- Esquema Metodológico



5 RESULTADOS

O campo de Dunas de Aracati – CE se caracteriza por possuir predominantemente lençóis de areia e dunas do tipo transversais no norte e centro da área e barcanoides mais ao sul, locomovendo-se no sentido E-W, esta fisionomia no caso das imagens Landsat, dificultou no trabalho de Durán (2020) identificar visualmente feições de algumas dunas transversais (Figura 10), já que em muitos casos não se apresentava uma diferença espectral entre a duna e a cobertura arenosa ao redor dela, neste caso a resolução radiométrica não foi o suficientemente sensível para ajudar a discriminar visualmente feições e estabelecer o perímetro de algumas dunas e lagoas interdunais, principalmente ao norte e centro do campo de dunas.

Figura 10. Duna Transversal encontrada no campo de dunas móveis



Fonte: Autor (2017)

De acordo com o trabalho de campo, foi observado que ao sul do campo de dunas, existem outro tipo dunas, as barcanoides (Figura 11), aqui foi possível identificar feições pela presença de lagoas interdunais e a vegetação, principalmente herbácea, presente no brejo interdunal, próximo às localidades Beirada e Canavieira.

Figura 11. Dunas Barcanoides no campo de dunas móveis



Fonte: Autor (2018)

A análise de mistura espectral (AME), proporcionou um produto que permitiu estabelecer desde o ponto de vista espectral, quanto mudaram as dunas e ofereceu uma análise de tendência, mostrando a direção de avanço das dunas. Inicialmente foi realizado uma análise visual das imagens SPOT para observar as mudanças visíveis. Com a geração dos componentes AME: água, vegetação e dunas, foi mais prático discriminar as dunas com relação aos outros tipos de cobertura.

Para este trabalho foi realizada a comparação temporal entre os componentes AME correspondentes ao campo de dunas para um intervalo de 11 anos. Foram calculadas as imagens diferença, entre os anos: 2002 – 2005, 2005 – 2006, 2006 – 2007, 2007 – 2011, 2011 – 2013, para posteriormente realizar as medições lineares de deslocamento entre dunas com a ajuda da visualização na composição RGB na ordem: Tempo 1 – Tempo 2 – Tempo 1. Infelizmente não estavam disponíveis imagens entre os anos 2008 e 2010 que foi o período onde se apreciaria mais a diferença entre o antes e depois da construção do parque eólico.

Um total de 21 locais foram escolhidos para obter valores de deslocamento total, com base nas diferenças observadas e identificadas na interpretação visual das imagens entre o intervalo de tempo escolhido (Figura 12).

Alguns dos locais escolhidos coincidem com o trabalho de Durán (2020), que é o caso dos pontos: 1, 4, 6, 8, 9, 11, 14, 13, 16 e 17, sendo que outros

novos puderam ser identificados com a resolução espacial das imagens SPOT. Sobre estes dados é importante mencionar que as imagens SPOT com uma resolução espacial de 10 m, vai ser o referente mínimo em termos de deslocamento de dunas que faz parte do componente “Dunas” derivado da aplicação do AME. Aqueles deslocamentos com valores inferiores não são considerados porque não puderam ser identificados. Para obter valores de deslocamento mais detalhados seria preciso aplicar a AME em imagens com altíssima resolução espacial, monitoramento e medições em campo.

Figura 12- Localização dos pontos de observação escolhidos para obter valores do deslocamento das dunas em Aracati – CE. Imagem SPOT R4G3B2, 02-09-2013.



Fonte: SPOT World Heritage, 2023.

A tabela 1, mostra os valores de deslocamento das dunas por cada ponto estabelecido, alguns pontos mantêm um registro contínuo, outros não foram observados na série temporal por diversos motivos, tais como não detecção de mudança, presença de nuvens ou sombra de nuvens sobre o ponto ou pela dinâmica de aumento/redução da lagoa interdunal. Os pontos ressaltados em azul correspondem a aqueles localizados ao oeste do parque eólico, no sentido da direção do vento, mas com as instalações do parque eólico funcionando como espécie de “barreira” no deslocamento das dunas.

Tabela 1- Valores de deslocamento das dunas entre 2002 e 2013

Pontos	2002-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2011	2011-2013	Deslocamento (m)
1	30	20	-	20	20	90
2	+	30	40	10	10*	90
3	+	20	40	30	10*	100
4	40	-	-	40	20	100
5	40	-	-	30	20	90
6	50	10	-	50	20	130
7	30	20	20	70	70	210
8	30	20	30	30	20	130
9	20	-	20	30	20	90
10	50	N	N	70	20	140
11	30	20	30	70	30	180
12	40	20	40	30	60	190
13	20	10	10	30	10	80
14	40	30	20	50	30	170
15	30	10	20	20	20	100
16	30	30	20	40	20	140
17	40	20	10	50	20	140
18	20	N	N	50	20	90
19	30	10	10	50	20	120
20	10	-	10	40	20	80
21	30	-	20	60	20	130

Fonte: Autor. (-) Não Observado. (+) alteração/redução na lagoa interdunal. (N) nuvem. (*) avanço e retenção na via do aerogerador.

As dunas localizadas nos pontos 7, 10, 11, 14, 16 e 17 destacam por mostrar os maiores valores de deslocamento em um período de 11 anos. O ponto 12 é o segundo local com maior deslocamento (190 m), localizado ao leste do parque eólico, acumulando material e mantendo sua dinâmica natural, aparentemente continua seu rumo natural em sentido ao manguezal do rio Jaguaribe.

A localização dos pontos 12, 15, 19, 20 e 21 (este último ponto próximo da figura 13) que se encontram ao leste das estradas de acesso aos aerogeradores, foi realizada para observar se existe alguma interferência das construções no avanço das dunas, já que o parque eólico está localizado na rota de avanço ao continente das dunas. De acordo com a tabela 1, estes locais mantiveram seu ritmo de deslocamento.

Figura 13. Vista próxima ao ponto 21 desde o campo de dunas para a planície fluvio-marinha e as piscinas de carcinicultura

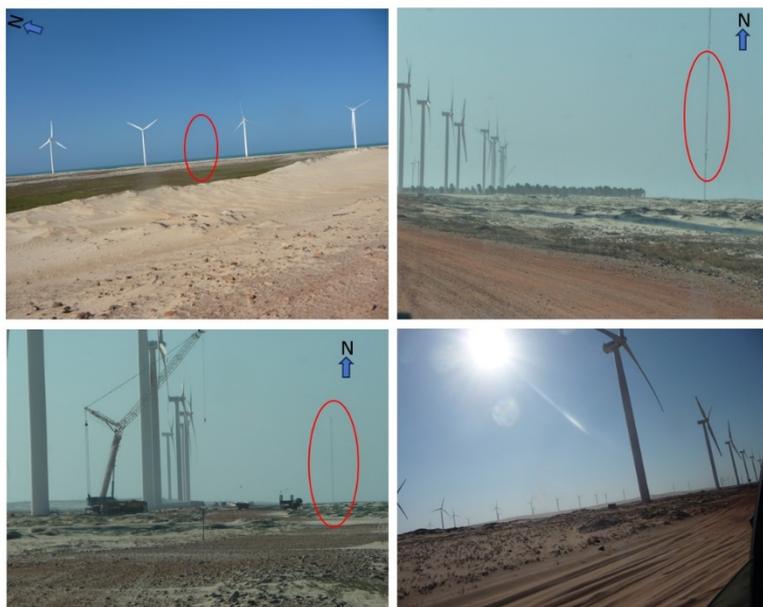


Fonte: Autor (2018)

Os pontos 2 e 3 correspondem a um local onde foram instalados aerogeradores sobre uma duna, mas o movimento da areia pelo vento na planície de deflação, brejos dunares, a duna e a lagoa interdunal, contribuem para a visualização de uma mudança que pode ser descrita como retenção e avanço da duna, já que se concentra na estrada de acesso.

A figura 14, corresponde a uma localização próxima dos pontos 2 e 3, onde é possível observar a construção linear dos aerogeradores mais próximos a praia, a fixação das dunas por compactação com material britado ao redor da estrutura e areia das dunas invadindo a estrada de acesso.

Figura 14. Aerogeradores próximos a praia e areia nas estradas de acesso



Fonte: Autor (2018)

Neste local é comum encontrar maquinaria removendo areia da estrada e realizando diversos trabalhos de fixação de dunas, como pode ser observado na figura 15 e 16, sendo este um exemplo de como a estrada de acesso funciona como barreira e reduz o deslocamento da duna.

Figura 15. Trabalhos de fixação de dunas com material britado e palha de coqueiro



Fonte: Autor (2018)

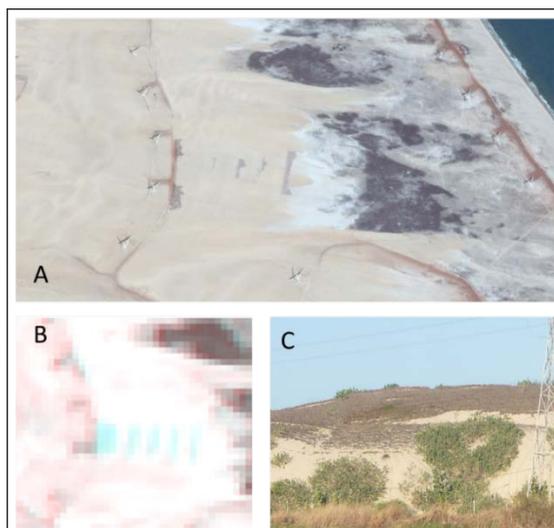
Figura 16. Remoção de areia das dunas na estrada de acesso ao parque eólico



Fonte: Autor (2018)

O AME permitiu identificar essa tentativa de fixação de dunas no trabalho de Durán (2020), como um elemento de mudança, na estrada principal que atravessa o campo de dunas de norte a sul (Figura 17), que configura um processo artificial de controle da migração dos campos de dunas móveis, utilizando palha de coqueiro disposta em formas lineares, ocupando uma faixa de aproximadamente 100m. Este processo foi verificado no catálogo de imagens de Google Earth, em uma imagem com data de 27/08/2013.

Figura 17- Processo de fixação artificial de dunas com o método AME.



Fonte: Durán, 2020. A. Imagem do catalogo de Google Earth de data 27/08/2013. B. Combinação RGB das imagens Landsat de 2012 – 2014, mostrando a mudança com a cor Cian. C. Vista de um processo de fixação de duna com palha de coqueiro na localidade de Cumbe em agosto de 2018, semelhante ao implantado no campo de dunas.

Os pontos 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 16 e 17 correspondem as dunas localizadas no limite do campo de dunas, umas próximas ao manguezal, outras ao povoado de Cumbe e arredores das piscinas de produção de camarão, além da construção das estradas de acesso ao parque eólico, vão acelerando o processo de fixação das dunas de forma direta (com barras de palha de coqueiro) ou indireta. Destacam o ponto 13 o local com menor deslocamento e o 7 com o maior deslocamento (Figura 18).

Figura 18. Ponto 7: Local de acesso ao parque eólico



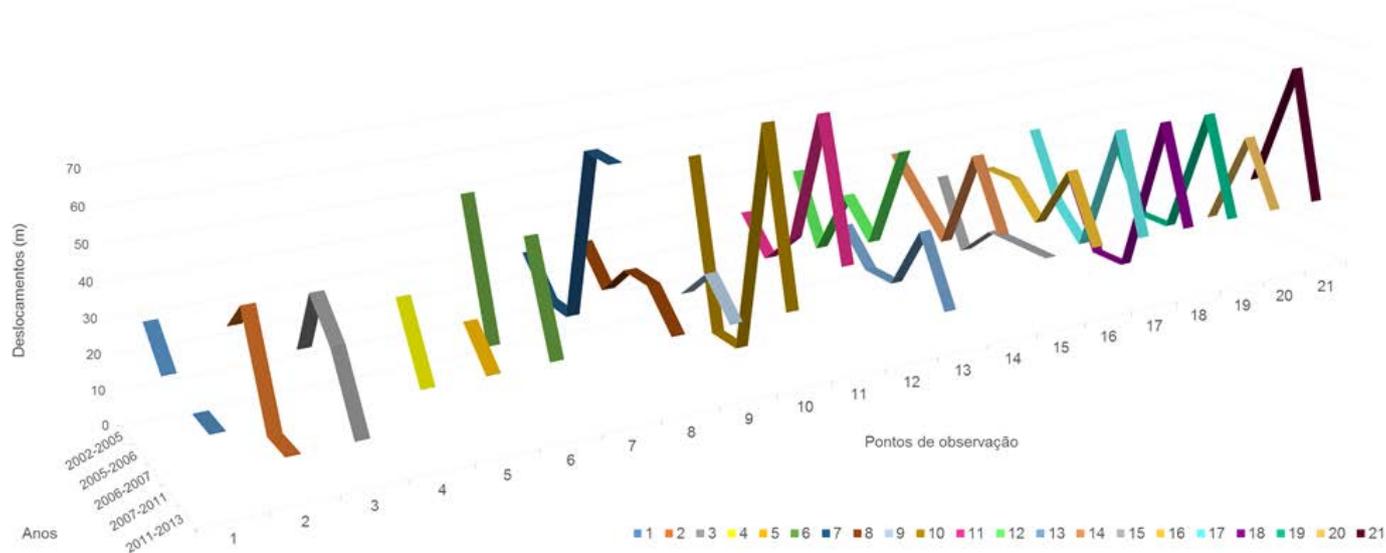
Fonte: Autor (2018)

A figura 19 mostra a tendência do deslocamento das dunas por cada ponto de observação entre 2002 e 2013. As linhas de tendência permitem observar o comportamento das dunas para cada pontos de observação, alguns com comportamento dinâmico sem interrupções (pontos 7, 8, 11 - 17, 19), outros com algumas quedas aleatórias que indicam uma possível redução na velocidade de avanço da duna, mas que no período seguinte recupera a tendência dinâmica (pontos 3, 8, 15). Pontos com deslocamento mínimo e em alguns períodos sem deslocamento aparente (pontos 1, 2, 5, 9, 13, 18, 20).

Até o ano 2007, podem ser observadas variações de deslocamento que podem ter relação com a quantidade e distribuição da precipitação anual, intensidade do ENOS, fenômeno da seca, assim como a intervenção antrópica, mas de forma geral, foi observada uma queda do deslocamento das dunas a partir do ano 2011, com exceção dos pontos 7 e 12, o que permite inferir o

processo de construção removeu e alterou consideravelmente a dinâmica morfológica das dunas.

Figura 19- Valores de deslocamento das dunas entre 2002 e 2013 por cada ponto de observação.



Fonte: Autor

Esta observação coincide com alguns apontamentos do trabalho de Pedrosa (2016), que estabeleceu no seu estudo que as maiores taxas de migração ocorreram entre 1988 e 2004, enquanto as menores taxas ocorreram entre 2010 e 2013, justo depois da construção do parque eólico. Este trabalho também mencionou que a precipitação pluviométrica diminuiu nesses anos junto com a taxa de migração, período que coincide com a última grande seca no estado de Ceará nos últimos 100 anos segundo a FUNCEME (2016).

Neste sentido, ocorreu um paradoxo que não coincide com o fato de uma migração maior das dunas no período de estiagem, sendo que Pedrosa (2016) tenta explicar a redução das taxas de migração das dunas pela contenção de sedimentos das dunas causada pela construção do parque eólico. A manutenção das vias de acesso para cada um dos aerogeradores e resguardo da base das estruturas da erosão eólica, tem gerado um processo de fixação generalizado e aleatório das dunas.

O trabalho de campo confirmou as observações de Meireles et al. (2013) e Pedrosa (2016), revelando que área ocupada pelo parque eólico por causa das terraplenagem, fixação de dunas e fragmentação de lagoas interdunais é gravemente degradadas, sendo alteradas a morfologia, topografia e fisionomia do campo de dunas.

A figura 20, mostra alguns dos maiores deslocamentos observados na área de estudo entre 2002 e 2013, aplicado uma diferença entre o componente dunas do tempo 1 (T1) e tempo 2 (T2), colocando o componente dunas na composição RGB na ordem: Tempo 1 – Tempo 2 – Tempo 1, onde destaca que durante este período de tempo o maior deslocamento foi de 210 m no ponto 7, que embora está localizado próximo a uma estrada de acesso ao oeste do parque eólico, não apresenta em termos numéricos alguma redução de deslocamento.

Este ponto é o local principal de acesso das instalações e sempre foi observado ao redor, remoção de areia das dunas que avançavam sobre a estrada, tentativas de fixação de dunas, ações antrópicas que podem ter influenciado o resultado de deslocamento deste ponto.

O ponto 13 apresentou o menor deslocamento a partir de 2011, assim como entre 2005 e 2007. Este local é um exemplo de como a ação antrópica pode afetar a dinâmica de movimento das dunas, já que se encontra entre uma estrada de acesso ao parque ao leste e fixação de dunas ao oeste para proteção das piscinas da carcinicultura. Embora a ação do vento continua transportando e acumulando material, as intervenções antrópicas estão acelerando o processo de fixação da duna.

O método de AME aplicado a imagens SPOT permitiu discriminar outros detalhes das áreas de dunas móveis, e mostrou a tendência de avance do campo de dunas em sentido sudoeste, confirmando uma relação direta com o padrão de vento dominante na região, com direção predominante variando de E a SE.

As imagens QuickBird estavam disponíveis num nível de processamento não compatível com a aplicação da AME, que requer trabalhar com valores derivados de grandezas radiométricas como a reflectância. Embora possuíam datas relevantes para este estudo, por ser de sensor diferente e resolução espacial diferente, foram utilizadas para fins comparativos e de validação de resultados.

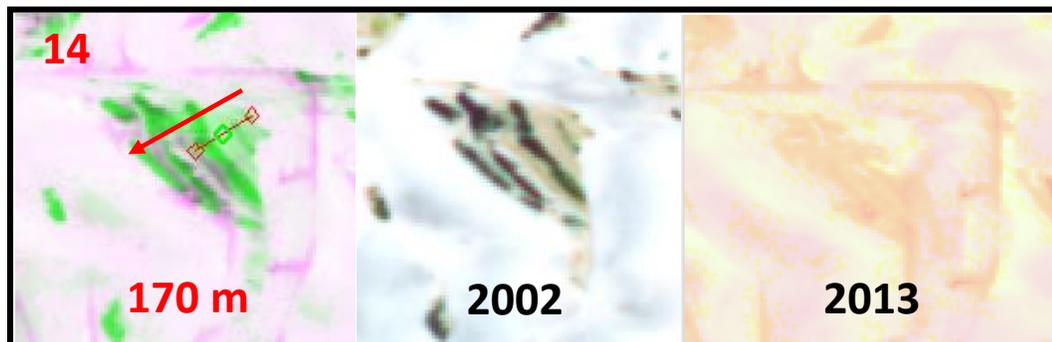
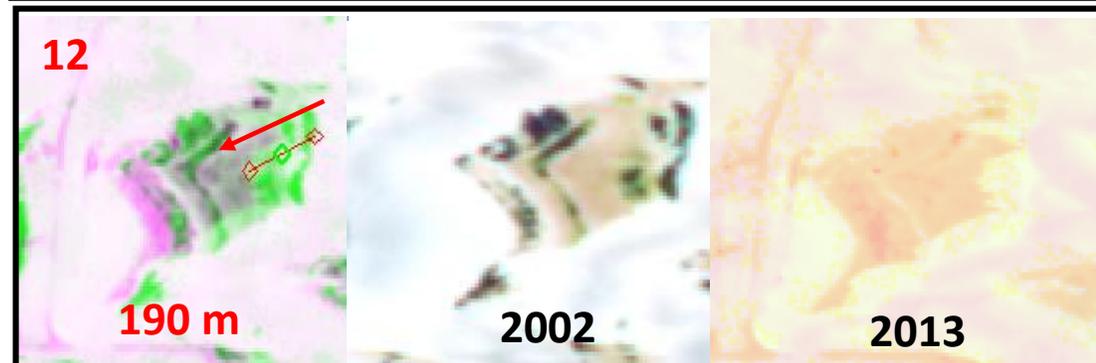
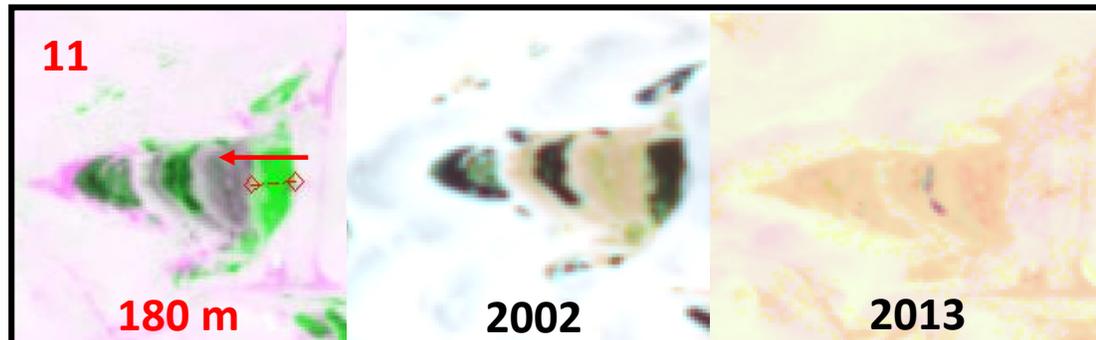
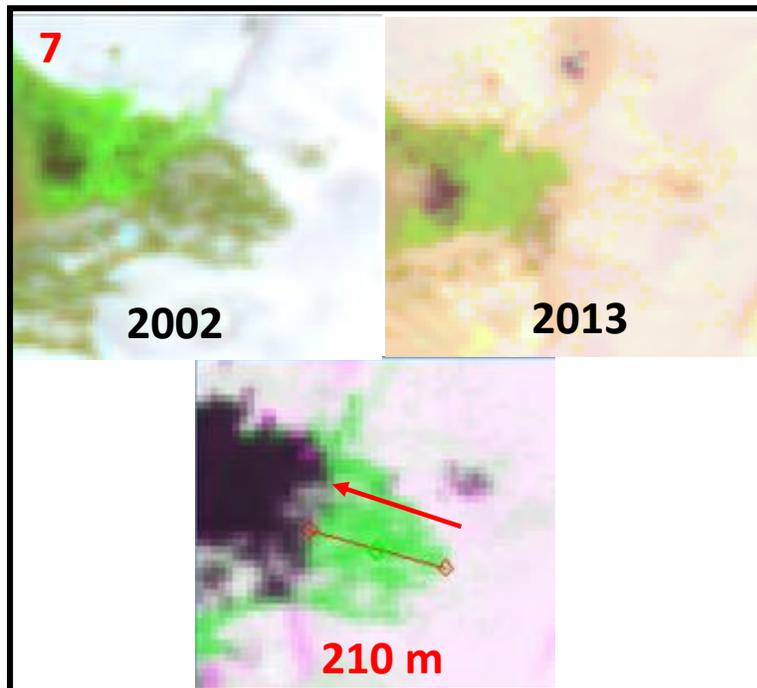
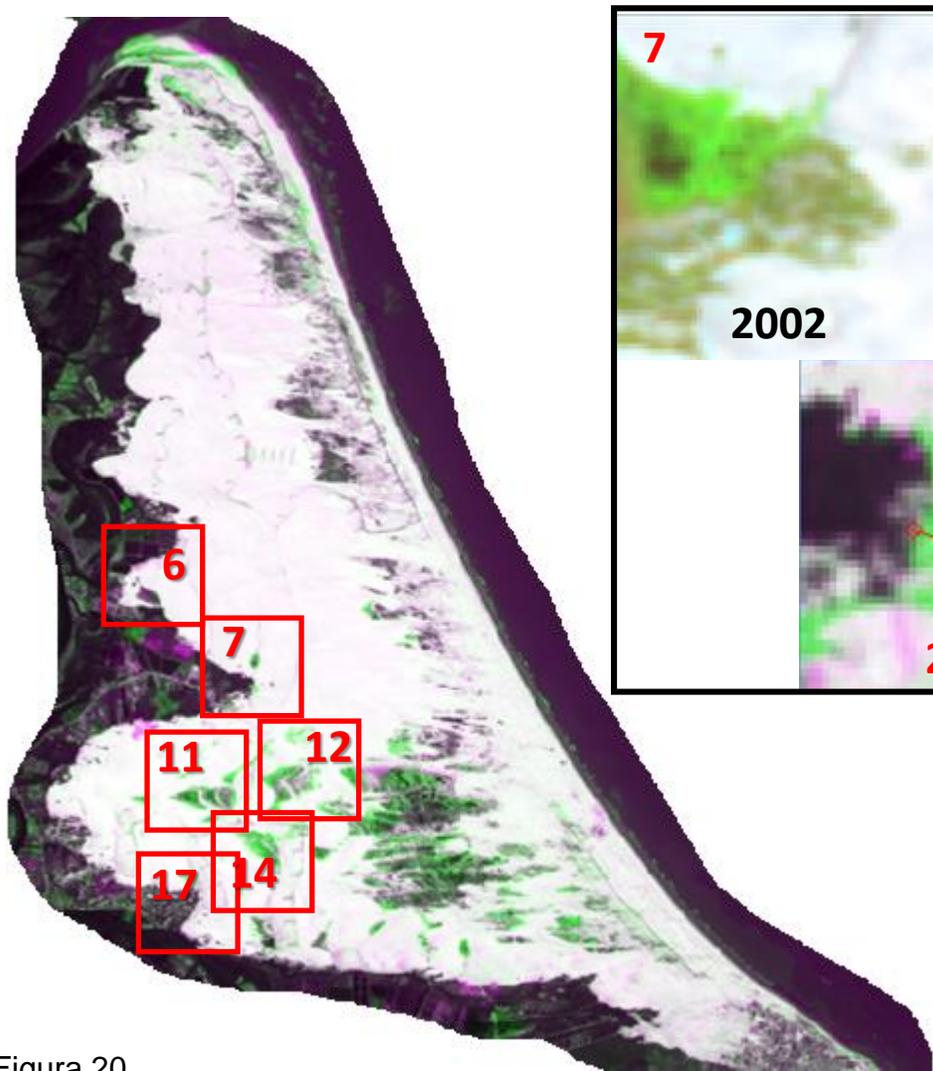


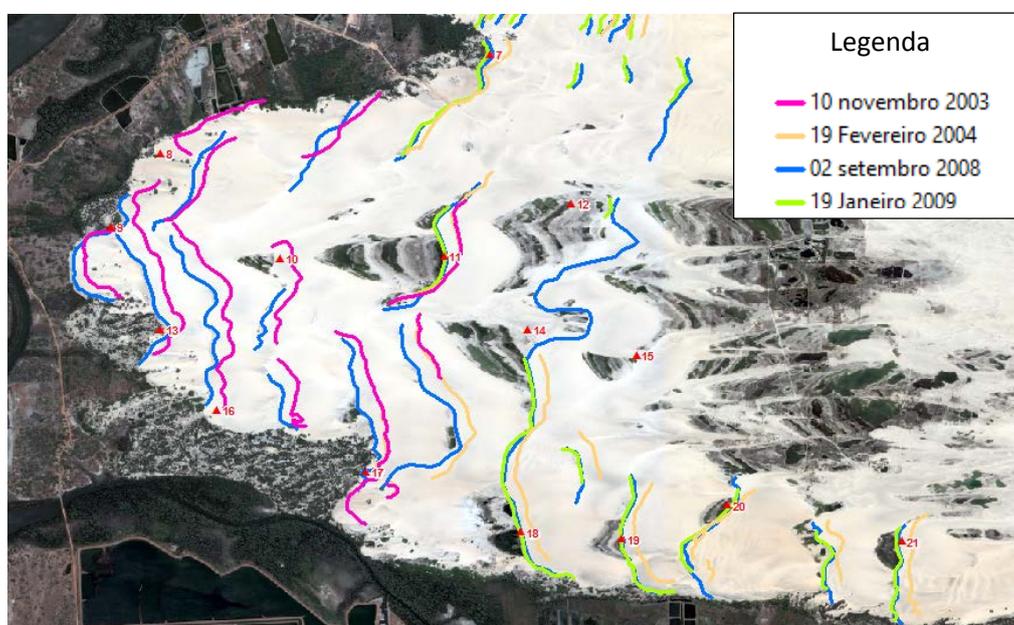
Figura 20. Visualização das mudanças nas dunas em Aracati – CE. Alguns exemplos dos maiores deslocamentos entre 2002 e 2013 com imagens Spot 5

Para validar as informações obtidas com as imagens SPOT 5, foi realizada sobre as imagens QuickBird a identificação e desenho do posicionamento das frentes de dunas entre os anos de 2003 e 2009, e utilizando os pontos de observação, foram realizadas algumas medições de movimentação de dunas, para comparar qualitativamente os valores de deslocamento obtidos a partir da AME (Figura 21).

A comparação foi feita de forma empírica nos pontos amostra, considerando os valores calculados na tabela 1. O critério de validação foi observar se o valor de deslocamento observado nas imagens QuickBird se aproximava à somatória dos valores da tabela 1 até o intervalo 2007 – 2011.

Se o valor total de deslocamento até o período 2007 – 2011 é inferior à somatória da tabela 1; e a distância medida entre os intervalos 2003 – 2004, 2004 – 2008, 2008 – 2009 é semelhante com os valores de deslocamento encontrados nas imagens SPOT 5 até o período 2007 – 2011, pode-se afirmar que existe uma parença entre os dados.

Figura 21 - Posicionamento das frentes de dunas entre os anos de 2003 e 2009



Fonte: Autor.

Algumas dunas não foi possível de identificar devido a que a cobertura das imagens QuickBird não é completa para toda a área de estudo em todos os

anos e/ou a morfologia da duna naquela data não era claramente visível na imagem, mas foram utilizadas 3 amostras com frentes de dunas facilmente identificáveis em todas as imagens utilizadas.

Ponto 11. Localizado ao oeste do parque eólico, duna barcanoide, mostra um deslocamento de 112 metros entre 2003 e 2009. Um valor inferior à movimentação entre 2002 e 2011 obtida com SPOT 5 de 140 m, e valores entre 10 e 20 m de deslocamento entre os anos 2003-2004 e 2008-2009, que estão dentro dos valores encontrados com as imagens SPOT 5. (Figura 22)

Figura 22- Ponto de validação – Ponto 11.



Fonte: Autor

Ponto 7. Localizado ao oeste do parque eólico, no limite do campo de dunas móveis, duna barcanoide, mostra um deslocamento de 121 metros entre 2003 e 2009. Um valor inferior à movimentação entre 2002 e 2011 obtida com SPOT 5 de 140 m, e valores entre 20 e 30 m de deslocamento entre os anos 2008-2009, semelhantes aos encontrados com as imagens SPOT 5 para outros anos (Figura 23).

Figura 23- Ponto de validação – Ponto 7.



Fonte: Autor

Ponto 18: Localizado ao oeste do parque eólico, no limite do campo de dunas móveis, duna barcanoide, mostra um deslocamento de 74 metros entre 2003 e 2009. Um valor superior mas muito próximo à movimentação entre 2002 e 2011 obtida com SPOT 5 de 70, e valores entre 10 e 20 m de deslocamento entre os anos 2008-2009, que estão dentro do valor encontrado com SPOT 5 entre 2007-2011 (Figura 24).

Figura 24- Ponto de validação – Ponto 18.



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

A pesquisa buscou identificar mudanças no campo de dunas móveis da planície costeira do Baixo Jaguaribe utilizando a técnica de análise de mistura espectral sendo que o método aplicado apresentou resultados satisfatórios, permitindo comparar, quantificar e descrever as mudanças.

As imagens SPOT 5 se mostraram um recurso útil em termos de resolução espacial e temporal para este estúdio. Em termos de resolução espacial, facilitou a identificação de dunas que não foram identificadas com Landsat no trabalho de Durán (2020).

Com relação à resolução temporal, o programa SPOT é o segundo (depois de Landsat) com um longo registro de imagens, aspecto necessário neste trabalho para conhecer o antes e depois da construção do parque eólico.

Tanto com as imagens SPOT 5 como com as QuickBird foi possível criar uma série multitemporal para identificar, quantificar e validar os deslocamentos das dunas. As imagens QuickBird foram utilizadas apenas para validação, já que pelo nível de processamento que possuem não podiam ser utilizadas para extrair informação espectral, embora seja recomendável este tipo de produto para este tipo de estudo.

Para estudos posteriores se sugere realizar estudos quantitativos ou estatísticos que permitam associar quantitativamente os dados das medições.

Com a perspectiva de imagens de novos sensores com maior resolução espacial disponíveis gratuitamente e com a expectativa de uma disponibilidade futura de imagens semelhantes para construir séries temporais multisensor, recomenda-se estudos semelhantes que permitam conhecer a dinâmica destes espaços antes da construção de novos empreendimentos, para avaliar os impactos e/ou recomendar outros locais alternativos.

Embora não foi possível ver com detalhe valores de movimentação de dunas entre 2008 e 2010, os dados encontrados mostraram uma tendência à redução do deslocamento das dunas depois da implementação do parque eólico.

Entre os anos 2011 e 2013, o fenômeno da seca afetou o estado do Ceará, pelo que segundo a teoria, quando se reduzem as precipitações aumenta a velocidade de movimentação das dunas, só que naturalmente não foi observado

algum incremento geral, só em dos locais bem específicos, os pontos 7 e 13 que possuem uma ação antrópica importante.

Neste sentido, pode-se dizer que a construção dos parques eólicos sobre o campo de dunas móveis, que é um ambiente dinâmico, se comporta como uma barreira que causa impacto na morfologia das dunas e desconfigura as formas do campo de dunas.

Este impacto aparentemente persiste no tempo, e a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento se mostraram úteis para o desenvolvimento deste trabalho e a metodologia aplicada com potencial de ser aplicada em áreas com características semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, J.B., SMITH, M.O. & JOHNSON, P.E. Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. **Journal of Geophysical Research**, **91**: 8098–8112. 1986.
- AMARANTE, O. A; ZACK, J; BROWER, M; SA, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobras, 2001.
- AIRBUS. **SPOT Imagery User Guide**. Airbus France: Defence and Space Intelligence. 2013.
- ASTRIUM. **SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide**. France: EADS – Astrium. 2013.
- ALVES, J.M.B.; RAPELLI, C. A variabilidade Pluviométrica do Setor Norte do Nordeste e o Evento El Niño -Oscilação Sul (ENOS). **Revista Brasileira de Meteorologia** V. 7, 583 -592 p. 1992.
- ARAI, E.; PEREIRA, G.; OLIVEIRA, L.; MORAES, E.; SHIMABUKURO, Y. Avaliação da concordância entre a reflectância estimada pelo sensor MODIS/Terra e a obtida in situ. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 6315-6322.
- MARTINS, Eduardo; NYS, Erwin; MOLEJÓN, Carmen; BIAZETO, Bruno; SILVA, Robson; ENGLE, Nathan. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. 1ª Ed. Brasília: Banco Mundial. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301625772_Monitor_de_Secas_do_Nordeste_em_busca_de_um_novo_paradigma_para_a_gestao_de_secas. Acesso em: 04 jan 2020
- BLOUNT, Grady; SMITH, Milton; ADAMS, John; GREELEY, Ronald; CHRISTENSEN, Phillip. Regional aeolian dynamics and sand mixing in the Gran Desierto: Evidence from Landsat thematic mapper images. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 95. No. B10. 463 – 482. 1990.
- BOARDMAN, JW; KRUSE, FA. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM - Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10, Ann Arbor, MI. Proceedings, Ann Arbor: **Environmental Research Institute of Michigan**, 1: 407-418. 1994.
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A. & GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data: In: Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 5, Pasadena, CA, Summaries. **JPL Publ.** 95-1. v. 1. p. 23-26. 1995.

BORENGASSER, M.; HUNGATE, W. S.; WATKINS, R. **Hyperspectral Remote Sensing. Principles and Applications**. USA: Taylor & Francis Group, LLC. 2008.

BRASIL. **Resolução n. 279 de 27 de junho de 2001**. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2001/res_conama_279_2001_licenciamentoambientalsimplificadoparaempreendimentos_eletricos.pdf> Acesso em: 25 may. 2016.

CARVALHO JÚNIOR OA, CARVALHO APF, GUIMARÃES RF, MENESES PR & SHIMABUKURO Y. Mistura espectral: (I) detecção dos membros finais utilizando a geometria do Simplex. **Espaço e Geografia**, 6(1): 147-173. 2003.

CARVALHO, Otamar. **As secas e seus impactos**. In: A Questão da Água no Nordeste. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – CGEE, 2012. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/669/4/A%20quest%C3%A3o%20da%20C3%A1gua%20no%20Nordeste.pdf>. Acesso em: 06 jan 2020.

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). **SPOT World Heritage – SWH Data Site**. France: CNES. Disponível em: <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60>. Acesso em: 02/05/2023

CHAVES, Leilane; BRANNSTROM, Christian; DA SILVA, Edson. Energia eólica e a criação de conflitos: ocupação dos espaços de lazer em uma comunidade no Nordeste do Brasil. **Sociedade e Território – Natal**. Vol. 29, N. 2, p. 49-69, Jul./Dez. de 2017.

CHAVEZ, P. S. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. **Remote Sensing of Environment** n. 24. p. 459-479. 1988.

CHRISTOPHERSON, Robert W. **Geossistemas – Uma introdução à geografia física**. Tradução: Francisco Eliseu Aquino ... (et al.). Porto Alegre: Bookman, 7ª edição, 2012. 718 p.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de Teledetección Espacial**. Tercera Edición. Madrid: Ediciones Rialp, S.A. 1996.

CHUVIECO, E. **Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio**. Barcelona. Ariel Ciencia – Editorial Plalíquida, S.A. 2010.

COLLADO, Alfredo D.; CHUVIECO, Emilio; & CAMARASA, Ana. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-range land boundary of Argentina. **Journal of Arid Environments**. 52: 121–133. 2002.

CORTEZ, Helder; LIMA, Gianni; SAKAMOTO, Meiry. A seca 2010-2016 e as medidas do Estado do Ceará para mitigar seus efeitos. **Parc. Estrat.** Brasília-DF. v. 22. n. 44. p. 83-118. jan-jun, 2017.

DASHTI, Hamid; POLEY, Andrew; GLENN, Nancy; ROBERTS, Dar; ENTERKINE, Josh; FLORES, Alejandro; USTIN, Susan; MITCHELL, Jessica. Regional scale dryland vegetation classification with an intergrated Lidar – Hyperspectral approach. **Remote Sensing**. Vol.11(2141). 2019. doi:10.3390/rs11182141

DIGITALGLOBE. **DigitalGlobe Satellite and Product Overview**. JACIE Workshop – September 2017. Disponível em: https://calval.cr.usgs.gov/apps/sites/default/files/jacie/DigitalGlobeOverview_JACIE_9_19_17.pdf. Acesso em: 25 ago 2018.

DONG, Pinliang. Automated measurement of sand dune migration using multitemporal lidar data and GIS. **International Journal of Remote Sensing**. Vol. 36, No. 21, 5426–5447. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1093192>

DURÁN, Gloria. **Análise Multitemporal de Uso e Cobertura da Terra nas Planícies Costeiras do Baixo Jaguaribe e de Camocim no Estado do Ceará com Fins de Determinação de Mudanças e Relações com a Instalação de Parques Eólicos**. 2020. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

EIA (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). **Wind Energy and the Environment**. Wind explained - Energy Information Administration (EIA). 2020. Disponível em: https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=wind_environment. Acesso 15 de jan. 2020.

FERNANDEZ, G. B.; MUEHE, D. Algumas Considerações sobre o Efeito do Fenômeno El Niño sobre Feições Costeiras ao Longo da Costa Brasileira. **GEOgrafia**, Ano VIII, N.15. 2006

FEDOROV, D. **Sistema semi-automático de registro e mosaico de imagens**. 2002. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

FEITOSA, E. A. N. et al. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**. Brasília: Dupligráfica, 2003.

FREITAS, M. A.S., 1997: Análise Estatística da Relação entre o Fenômeno do El Niño e a Seca no Estado do Ceará. **Anais....** III Encontro de Iniciação à Pesquisa, de 15 a 17 de setembro de 1997, Universidade de Fortaleza – UNIFOR

FUNCEME. **Ceará passa pela pior seca prolongada desde 1910**. 12 setembro de 2016. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme). Disponível: <http://www.funceme.br/?p=1403>. Acesso em: 07 jan 2020.

FRYBERGER, S., GOUDIE, A. S., 1981. Arid Geomorphology. Progress in Physical Geography, 5, 420–428. [CrossRefGoogle Scholar](#)

GONDIM, Joaquim; FIOREZE, Ana; ALVES, Rodrigo; Souza, Wesley. A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos. **Parc. Estrat.** Brasília-DF. v. 22. n. 44. p. 277-300. jan-jun, 2017.

GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian. **Diretrizes para o planejamento socialmente justo com vistas a implantação de parques eólicos no Brasil.** In: GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian; MEIRELES, Antonio. Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil. Edições UFC. Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://www.observatoriodaenergiaeolica.ufc.br/wpcontent/uploads/2019/07/livro_web.pdf>

GLCF (GLOBAL LAND COVER FACILITY) Goddard Space Flight Center (GSFC), **Landsat Surface Reflectance, Landsat TM & ETM+, Global Land Cover Facility.** University of Maryland, College Park. 2011.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P., CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 26, no. 1, p. 65-74. 1988.

GUTIÉRREZ, Mateo. **Geomorfologia Climática.** Barcelona: Ediciones Omega, S.A. 2001. 642 p.

JENSEN, J. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese Editora. 2009. p 598.

JI, Cuicui; JIA, Yonghong; GAO, Zhihai; WEI, Huaidong; LI, Xiaosong. Nonlinear spectral mixture effects for photosynthetic/non-photosynthetic vegetation cover estimates of typical desert vegetation in western China. **Plos one** 12(12). 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189292>

JIMENEZ, J. A.; MAIA, L. P.; SERRA, J.; MORAIS, J. Aeolian Dune Migration along the Ceara Coast, North-Eastern Brazil. **Sedimentology.** 46: 689–701. 1999. doi:10.1046/j.1365-3091.1999.00240.x.

HUGENHOLTZ, C.H.; LEVIN, N.; BARCHYN, T.E.; BADDOCK, M.C. Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: a review and outlook. **Earth-Science Reviews.** 111:319-334. 2012.

MAGALHÃES, Antonio. **Cap. 1. Vida e seca no Brasil.** In: Secas no Brasil: política e gestão proativas. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Banco Mundial. 2016. Disponível em: https://www.cggee.org.br/documents/10195/11009696/seca_brasil-web.pdf/793de1a2-157e-4098-b84a-9d2348266252?version=1.4. Acesso em: 09 jan 2020.

MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction.** Third Edition. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

MEIRELES, A.J. A, GORAYEB, A, SILVA, D.R.F, LIMA, G.S. Socioenvironmental impacts of wind farms on the traditional communities of the western coast of Ceará, in the Brazilian Northeast. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), **Journal of Coastal Research**, Special Issue No. 65, pp. 81-86. 2013.

MEIRELLES, Jeovah. **Dinâmica costeira.** 15-27 de aug de 2016. 281 p. Notas de Aula.

MEMORIS. SCOPING STUDY ON OPEN DATA, INNOVATIVE TECHNOLOGYBASED SOLUTIONS FOR BETTER LAND GOVERNANCE. Final Report. Global Donor Platform for Rural Development. 2015. Disponível em: <https://www.donorplatform.org/wp-content/uploads/2022/08/Scoping-study-on-open-data-innovative-technologybased-solutions-for-better-land-governance.pdf>. Acesso em: 23 jun 2023.

MENDES, Jocicléa. **Parques eólicos e comunidades tradicionais no nordeste brasileiro: estudo de caso da comunidade de Xavier, litoral oeste do Ceará, por meio da abordagem ecológica/participativa.** 2016. 162 f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MENESES, P. R.; MADEIRA, J., SILVA, J. (Org.). **Sensoriamento Remoto. Reflectância dos alvos naturais.** Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília - UnB, Embrapa Cerrados, 2001.

MORAIS, J.O. **Compartimentação territorial e evolutiva da zona costeira do Estado do Ceará.** In: Lima, L.C (et al.) org. **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará.** Editora: FUNECE: Fortaleza, p: 106-180, 2000

MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.S; PESSOA, P.R.S. Coastal Erosion Processes at Ceara State-Brazil. Coastal Zone Canadá 2002. **Coastal Zone Association. Ontário**, v.1, n.1, 2002.

MUEHE, Dieter. **Erosão e progradação no litoral brasileiro.** Brasília: Ministerio do Meio Ambiente. 2006. 476 p.

NOBRE, Paulo. **As origens das águas no Nordeste.** In: A Questão da Água no Nordeste. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – CGEE, 2012. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/669/4/A%20quest%C3%A3o%20da%20C3%A1qua%20no%20Nordeste.pdf>. Acesso em: 06 jan 2020.

NOVO, E. M. L. De M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Editora Blucher, 2008.

NULL, J. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Based on Oceanic Niño Index (ONI). April 2018. In: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em: 10 abr. 2018.

LANCASTER, Nicholas; MCCARLEY-HOLDER, Grace. Decadal-scale Evolution of a small dune field: Keeler Dunes, California 1944–2010.

Geomorphology. 180-181. 281-291. 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.017>

LEVIN, Noam; TSOAR, Haim; HERRMANN, Hans Jürgen; MAIA, Luis P.; CLAUDINO-SALES, Vanda. Modelling the formation of residual dune ridges behind barchan dunes in North-east Brazil. International Association of Sedimentologists, **Sedimentology**. 56, 1623–1641. 2009. doi: 10.1111/j.1365-3091.2009.01048.x

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**, 5th ed. New York: John Wiley & Sons. 2004. p 763.

LU, D. et al. Change detection techniques. **Int. J. Remote Sensing**. vol. 25, no. 12, 2365–2407. 2003. DOI: 10.1080/0143116031000139863

OKINA, Gregory S.; ROBERTS, Dar A.; MURRAYA, Bruce; OKIN, William J. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. *Remote Sensing of Environment*. n. 77. p. 212–225. 2001.

OLIVEIRA, Patrícia. **Caracterização morfológica e sedimentológica da plataforma continental brasileira adjacente aos Municípios de Fortim, Aracati e Icapuí - CE**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

PAN, Jinghu; LI, Tianyu. Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. **Natural Hazards**. N 68. P. 915 – 927. 2013

PEDRAZA, Javier. **Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones**. Editorial Rueda, S.L. Madrid. 1996.

PEDROSA, Adriana (2016). **A geodinâmica e morfogênese das dunas eólicas no Município de Canoa Quebrada, Aracati, Ceará, Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PEREIRA, G., MORAES, E.C., ARAI, E., OLIVEIRA, L.G.L. Estudo preliminar da estimativa da reflectância e albedo de microssistemas pantaneiros a partir de imagens de satélite. **Anais....** 1º Simpósio de Geotecnologia no Pantanal, Gampo Grande, MS, 11-15 de novembro de 2006

PONZONI, F.; SHIMABUKURO, Y.; KUPPLICH, T. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos. 2012. p. 160.

PYE, K.; TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009

QUARMBY NA, TOWNSHEND JR, SETTLE JJ, WHITE KH, MILNES M, HINDLE TL, SILLEOS N. Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. **Int J Remote Sens** 13: 415-425. 1992.

RAY, Terrill W.; MURRAY, Bruce C. Nonlinear Spectral Mixing in Desert Vegetation. **Remote Sensing of Environment**. 55. 59 - 64. 2019.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. Third Edition. USA: Elsevier Inc. 2007.

SEMACE. **Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada**. 9 dez 2010. Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Governo do Estado de Ceará. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/09/area-de-protecao-ambiental-de-canoa-quebrada/>. Acesso em: 25 abr 2023

SETTLE, J. J.; DRAKE, N. A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. **International Journal of Remote Sensing**, 14:6, 1159-1177, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431169308904402>

SHALABY, Adel; TATEISHI, Ryutaro. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. **Applied Geography**. 27. 28–41.2007. doi:10.1016/j.apgeog.2006.09.004

SHIMABUKURO, Yosio Edemir, PONZONI, Flávio Jorge. **Mistura Espectral**. Modelo linear e aplicações. Ed. Oficina de Textos. 2017.

SHIMABUKURO, Yosio Edemir; NOVO, Evlyn Moraes; PONZONI, Flávio Jorge. Índice de Vegetação e Modelo Linear de Mistura Espectral no Monitoramento da Região do Pantanal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.33, Número Especial, p.1729-1737, out. 1998

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16– 20, 1991.

SINGH, Ashbindu. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **Int. J. Remote Sensing**. vol. 10, no. 6, 989-1003. 1989. doi=10.1080/01431168908903939

SMITH, Milton O.; USTIN, Susan L.; ADAMS, John B.; GILLESPIE, Alan R. Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of Abundance from Multispectral Images. **Remote Sens. Environ**. N. 31: p.1-26. 1990a.

SMITH, Milton O.; USTIN, Susan L.; ADAMS, John B.; GILLESPIE, Alan R. Vegetation in Deserts: I. Environmental Influences on Regional Abundance. **Remote Sens. Environ.** N. 29: p.27-52. 1990b.

SEINFRA. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará.** Secretaria da Infra-Estrutura do Governo do Estado do Ceará. 2004.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems.** New York: Addison-Wesley, 1980. 515p.

SOARES, L. T. **Planejamento e implantação de um parque eólico.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010

SOUZA, M. J. N. **Compartimentação geoambiental do Ceará.** In.: Silva. J. B. (Org.). Ceará: um novo olhar geográfico. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2005.

SPOT IMAGE. **Ficha Técnica SPOT Image. Resolución y modos espectrales. 2009.** Disponível em: <http://www2.astriumgeo.com/files/pmedia/public/r1996_9_resolucion_modos_espectrales__esp_sept2010.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013.

SPOT IMAGE. Los satélite SPOT em números. Ficha Técnica. SPOT Image 2010. Disponível em: https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r1992_9_lossatelitesSPOTennumeros_esp_sept2010.pdf. Acesso em: 25 mar 2023

TEWKESBURY, Andrew et al. A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques. **Remote Sensing of Environment.** 160. 1–14. 2015.

USGS. Landsat Satellite Missions. USGS – Landsat Missions. 2022. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>. Acesso em: 27/04/2023.